

JAERI-M

86-005

高崎研 1 号加速器 (デュアルビーム型,
2 MeV, 60 kW) の電子線出力特性

1986 年 2 月

金沢 孝夫・春山 保幸・宇野 定則
四本 圭一・田中 隆一・鶴野 正光
吉田 健三

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

高崎研 1号加速器（デュアルビーム型,
2MeV, 60 kW）の電子線出力特性

日本原子力研究所高崎研究所開発部
金沢 孝夫・春山 保幸・宇野 定則
四本 圭一・田中 隆一・鷲野 正光⁺
吉田 健三

(1986年1月17日受理)

昭和 56 年 1 月に高崎研究所に設置したデュアルビーム型電子加速器の照射利用のため、電子線出力特性の測定結果をまとめた。本加速器は垂直方向及び水平方向の 2 本の加速管を有していて、共通の電源部により発生された高電圧を切換えることにより、二方向に電子ビームを取出すことができる。出力範囲は加速電圧 0.5 ~ 2.0 MV, 電流 0.1 ~ 30 mA であり、電子ビームの最大走査幅は垂直ビームでは 120 cm, 水平ビームでは 60 cm である。

本加速器の照射利用に必要な出力特性データとして、主に垂直ビームの電子流密度分布及び深部線量分布の諸データを示した。また表面線量率分布、水平ビーム照射室内の空気中の線量率分布、温度上昇率測定結果も付け加えた。

高崎研究所：〒370-12 群馬県高崎市綿貫町 1233 番地

+ 現高崎研究所付

Output Characteristics of 2 MeV, 60 kW, Dual Beam Type
Electron Accelerator of TRCRE, JAERI

Takao KANAZAWA, Yasuyuki HARUYAMA, Sadanori UNO,
Keiichi YOTSUMOTO, Ryuichi TANAKA,
Masamitsu WASHINO⁺ and Kenzou YOSHIDA

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 17, 1986)

The output characteristics of the dual beam type electron accelerator installed at Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI in 1981 are described for the convenience of users. The accelerator has two accelerating tubes, for vertical and horizontal beams. The electron beam is independently generated in either direction by using the high voltage switching system.

The output of the accelerator is controllable from 0.5 MeV to 2.0 MeV in the acceleration voltage and from 0.1 mA to 30.0 mA in the beam current. The maximum scanning width is 120 cm for vertical beam and 60 cm for horizontal beam.

The beam current density distribution and depth-dose distribution for the vertical beam are mainly described as output characteristics of the accelerator. The surface dose distribution, the air dose rate distribution in horizontal beam irradiation room and the temperature rise in the irradiated material during a electron beam irradiation are also described.

Keywords; Output Characteristics, Dual Beam, Electron Accelerator, Vertical Beam, Horizontal Beam, Acceleration Voltage, Beam Current Density Depth-dose Distribution, Electron Beam Irradiation, Scanning Width

+ Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. デュアルビーム型加速器	2
2.1 装置の概要	2
2.2 装置の仕様性能	2
2.3 装置の構成	3
2.4 付帯設備	5
2.5 加速器の操作と回路特性	7
3. 電子線出力特性	10
3.1 加速電圧と出力電流の校正	10
3.2 電子流密度分布	11
3.3 深部線量分布	12
3.4 表面線量率分布	14
3.5 水平ビーム照射室内の線量率分布	15
3.6 試料の温度上昇	16
4. あとがき	18
謝 辞	18
参考文献	19

Contents

1. Introduction	1
2. Dual beam type electron accelerator	2
2. 1 General description of the accelerator	2
2. 2 Accelerator specification	2
2. 3 Configuration of the accelerator system	3
2. 4 Incidental equipments	5
2. 5 Operational procedures of the accelerator and characteristics of high voltage circuit.	7
3. Output characteristics of electron beam	10
3. 1 Calibrations of electron energy and beam current	10
3. 2 Distributions of electron beam current density	11
3. 3 Depth-dose distribution	12
3. 4 Distributions of surface absorbed dose	14
3. 5 Air dose-rate distribution in the horizontal beam irradiation room ..	15
3. 6 Temperature rise induced by irradiation	16
4. Summary	18
Acknowledgement	18
References	19

1. はじめに

高崎研究所 1 号加速器は、昭和 56 年 1 月に共振変圧器型加速器（昭和 39 年設置、最大定格 2 MeVp, 6mA, 米国 G・E 社製）からデュアルビーム型加速器（垂直、水平両方向の 2 式の加速管、^{1), 2)}最大定格 2 MeV, 30mA, 日本の日新ハイボルテージ社製）に更新された³⁾。

新 1 号加速器の最大の特徴は、1 式の高電圧発生部で垂直、水平両方向に出力ビームを取り出す（デュアルビーム方式）ことができる点にある。このため垂直ビーム用、水平ビーム用の 2 つの照射室でそれぞれ独立に照射実験を行うことができる。また垂直ビーム発生中であっても水平ビーム照射室へ自由に入出する照射準備作業が可能であることから加速器の利用効率が高められる。

本加速器の高電圧は、整流器とコンデンサーを 12 段組合せたコッククロフト・ウォルトン型回路で発生され、その高電圧を高電圧切換装置を用いて垂直方向、水平方向に切換える。³⁾出力範囲は 0.5 ~ 2.0 MeV, 0.1 ~ 30 mA である。

本加速器は設置以来 4 年を経過し研究所内外の各種研究開発に利用されている。垂直ビームは廃水処理、プラスチックの改質、キュアリング、汚泥処理、半導体の照射効果の研究に利用され、水平ビームは排煙処理、複合材料の劣化試験、X 線ターゲットの開発、線量測定技術の開発などの研究に利用してきた。昭和 60 年 3 月末における本加速器の高電圧印加時間は約 2200 時間（うち水平ビーム利用分が約 1150 時間）に達している。

この間に、所内照射利用、所外共同利用と並行して、電子エネルギーと出力電流の校正、電子流密度分布、照射された試料内の吸収線量分布など、ビーム出力性能についての測定実験を、垂直ビーム、水平ビームの両方とも繰返し行った。その結果、0.5 MeV から 2 MeV までの出力特性のパラメーターが明らかになり、垂直水平の両ビームを精度よく利用できるようになった。

本報告ではまずこの加速器の概要、構成について簡単に述べる。そして加速エネルギー、ビーム電流の校正結果および電子流密度分布、表面線量率分布、深部線量分布の測定結果を示す。また照射利用上で有用なデータとして、水平ビーム照射室内空間線量分布および試料中の温度上昇率についても測定結果を示す。

2. デュアルビーム型加速器

2.1 装置の概要

本装置は最大出力 2MeV, 30mA, 60kWで、電源部、高電圧発生回路、高電圧切換装置、垂直用および水平用の 2式の加速管、スキャニング部と付属装置で構成される。直流高電圧はバランス形コッククロフト・ウォルトン回路で発生され、SF₆ガスで絶縁される。

加速器圧力容器内の構成部品配置を Fig. 1 (JAERI-M 84-032 より引用) に示す。

図に見られるように本加速器は中央部にある高電圧発生系に垂直ビーム用、水平ビーム用の 2式の加速管部を接続して、電子線出力を垂直方向、水平方向の任意の方向に取り出す方式を採用している。

照射方向の設定は「運転方向設定スイッチ」で行い、この設定スイッチを動かすことにより「高電圧切換装置」が動作し、水平加速部に対して直流高電圧を入・切する。垂直方向に設定の場合、「高電圧切換装置」は高電圧ターミナル部に格納された状態になる。それと同時に、水平加速部は「接地装置」により接地され、水平ビームラインは「X線シャッター」により遮蔽される。そして垂直方向において 2MeV, 30mAの最大出力を発生している場合でも、水平ビーム照射室内の漏洩放射線量はバックグラウンドレベルに保たれるため、安全に水平ビーム照射室内での作業を行うことができる。

本加速器の付帯設備としてオゾン処理装置、垂直ビーム照射用コンベヤおよびデュアルビーム方式に対する安全確保のための安全監視設備がある。(本加速器についての詳細な説明は JAERI-M 84-032 2MeV, 60kW デュアルビーム形電子加速器照射施設 参照)

2.2 装置の仕様性能

加速電圧： 0.5～2.0MV 連続可変

ビーム電流： 0.1～30mA "

ただし加速電圧 0.8MV以下では最大ビーム電流は加速電圧とともに徐々に減少し、0.5MVでは 10mA。

定格出力： 60kW

安定度： 加速電圧安定度 ±40kV (0.5～2.0MV の範囲で設定値の ±2%以内)

ビーム電流安定度 3mA未満 ±15μA以内

3～30mA ±300μA以内

(設定値の ±2%以内目標値)

ビーム走査： 走査幅 垂直ビーム 最大 120 cm

水平 " " 60 cm

ビーム分布均一度 ±5%以内 (窓下 15 cm)

走査角度 垂直 60° (120 cmに対し)
 水平 40° (60 cmに対し)
 走査周波数 200 Hz
 連続運転: 両方向とも連続自動制御運転が可能

2.3 装置の構成

Fig. 2 に本加速器の主要構成機器の配置を示す。この図は 1 号加速器棟の 2 階平面を示しており、Acc. Room の真下の 1 階に垂直ビーム照射室があり、3 階に照射機械室、2 階屋上に SF₆ ガス回収用ストレージタンクが配置されている。

2.3.1 電源部

直流高電圧部入力用の高周波電源であり、高周波電動発電機（立形、入力 3 kV, 50 Hz, 200 kVA、出力 64 ~ 640 V, 3 kHz, 134 kVA、水冷式）とその出力を昇圧するための 2 式の OF 式絶縁変圧器（出力 80 kV, 150 kVA）および進相容量補償用の調整リアクトル（容量は 2 台あわせて 240 kVA）で構成される。

2.3.2 直流高電圧発生部

高圧発生部は 12 段のシリコン整流器とコンデンサの組合せで構成される。圧力タンク内に Fig. 1 に示すような配置で積み上げられ、高さは約 2 m である。

圧力タンクには絶縁用の SF₆ ガスが約 6 kg / cm² G の圧力で封入されており、上部に SF₆ ガス冷却装置が設置されている。

2.3.3 加速管部

加速管部は電子銃、加速管、ショーティングロッドなどで構成される。

フィラメントは純タングステン製で U 字形をしている。

加速管は垂直用、水平用とも全く同一の材質、構造である。加速管は円筒状の耐熱ガラスとアルミニウム合金製の電極を交互に積み重ねて接着したもので、段数は 55 段である。管内はイオンポンプにより 10^{-6} ~ 10^{-8} mm Hg の高真空に保たれ、加速管各電極には加速電圧をブリーダー抵抗で分圧した電位が与えられる。垂直用と水平用のブリーダー抵抗は設置当初は同一のものを使用していたが水平方向の電子流安定性を増すため、昭和 58 年 10 月に水平方向のみ従来の約 1/2 の抵抗値のブリーダー抵抗に変更した。加速電圧とブリーダー電流の関係を Fig. 3 に示す（垂直方向は Fig. 3-a、水平方向は Fig. 3-b）。エネルギー区分によってブリーダー電流が異なるのは次に述べるショーティングロッドの使用によるものである。

ショーティングロッドは加速電圧の可変範囲が大きい（本加速器の場合 0.5 ~ 2.0 MV であるから 1 : 4 となる）ときに、加速管内の電子ビームの引き出し、集束条件を一定にするため加速電極の一部を短絡するための機構で、本加速器では 1 MV 以下の加速電圧の場合に 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 の 4 段階に分けて、加速電極を短絡している。

ショーティングロッドはパルスマーターによって接触子を移動させ必要な電極数を短絡する方式で、加速電圧の設定に応じて自動的に動作し、垂直用、水平用とも同時に動作する。

2.3.4 高電圧切換部

デュアルビーム方式に特有の機構がこの部分であり、高電圧切換装置、接地装置、X線シャッターで構成され3つの装置は1つのスイッチで連動する。

2.3.5 スキャニング部

スキャニング部はスキャンホール、スキャニングコイル、照射窓、冷却風吹出ノズルおよびビームシャッターで構成される。垂直用スキャニング部をFig. 4-aに示す。水平用スキャニング部配置をFig. 4-bに示す。

垂直用と水平用のスキャニング部はそのスキャンホールの大きさ（約1500 mmと750 mm）および据付方向は異なるが、ほぼ同じ構成である。スキャニング部はオゾンによる酸化を防ぐため主にステンレス鋼で製作されている。

加速電子をX軸方向（スキャンホールの長手方向）に走査する方法は電磁走査であり周波数は200 Hzである。またY軸方向（X軸と直角の方向）についても静止照射の場合のビーム平坦度を向上させる目的で50 Hzの正弦波電源を用意した。しかしFig. 5にY軸方向走査をした場合（Y-Scan用coilへの入力を、ビームがスキャンホールにかかる範囲で最大にする=Y-Scan 40%）としない場合（Y-Scan用coilの入力を0%とする）を1 MeVと2 MeVの2通りについて示すように殆ど効果がみられないで、Y軸走査機能は普通照射には用いていない。Y軸走査の効果が少ない理由としては、①ビームスポットの径が2～3 cmと大きい、②スポット径に比し照射窓幅が狭いので強く走査すると窓枠にあたってしまうため、などが考えられる。

加速され走査された電子が加速管の高真空中から大気中に飛び出してくる部分である照射窓は、50 μm厚さのチタニウム（原子番号22、比重4.5）であり、真空シールには金属製Oリングを用いている。

本加速器のスキャニング部は、接合部にFRPをはさみ込むことにより大地に対して絶縁されているので、ビーム発生中に散乱等によりスキャンホールに流入する電子流（すなわち照射試料面に到達しない電子流）を測定することが可能である。Fig. 6に水平方向照射の場合、前記流入電子流とビーム電流の関係を示す。このスキャンホール流入電子流は、加速電圧が低いほど、また照射物の絶縁抵抗が高いほど大きくなる傾向がある。

ビームシャッターは静止照射の場合の照射時間の制御、ビームコンディショニング時のオゾン発生量の抑制および床面や周囲構造材の過熱防止の目的で用いられる。ビームシャッターはエアーシリンダーで駆動され、ガイドレールに沿って直線的な開閉動作を行う。ビームシャッターの冷却は水冷で行われる。

2.3.6 真空排気装置

加速管内およびスキャンホール内の真空排気はイオンポンプを用いて行う。垂直系イオンポンプはスキャニングコイルの上部に、水平系イオンポンプはFig. 1に示すようにX線シャッターの

下部にそれぞれ取り付けられている。

照射窓箔や電子銃フィラメントの交換後の粗引き、ビームコンディショニング時には、油回転ポンプおよびクイックコンディショナー（チタニウム・ゲッターポンプ）を用いる。これは垂直方向、水平方向のどちらの場合も同様である。

真空度は運転時が $10^{-6} \sim 10^{-7}$ mmHg（ビーム電子流により異なる）で、静止時が 10^{-8} mmHgに近い値である。

2.3.7 付属装置

(1) SF₆ガス回収装置およびストレージタンク

本装置は圧力タンク内機器の点検や故障修理等で、圧力タンクをオープンする際に絶縁用のSF₆ガスを回収貯蔵するために設置する。SF₆ガスは圧力タンク（29m³）からストレージタンク（25m³）に気体の状態で回収充填される。本装置は、充填用コンプレッサー、除湿装置、真空排気装置などで構成される。圧力タンク内のSF₆ガス残圧 10⁻³ mmHgまで回収可能であり、所要時間は約6時間である。

(2) 照射窓冷却ブロワー

チタニウム製照射窓を冷却するためのブロワーで、冷却空気の吐出圧は0.4 kg/cm²Gで、垂直用は7 N m³/min、水平用は3.5 N m³/minの送風量である。この冷却ブロワーからの冷却空気を途中で分岐して取り出してスキャニング部の接続ボックス内のオゾンページ用としても用いている。

(3) 操作・故障記録装置

本装置は加速器の運転制御系およびインターロック系統の状態を把握し、照射運転状況の連続的監視を可能にする。本装置には次のような機能がある。

1) 運転日誌作成

所定のフォーマットに従って加速器各部の運転特性のアナログ量瞬時値をロギング用紙にプリントアウトする。

2) 操作記録

加速器本体および付属機器のリレー接点の状態をサンプリング周期1秒で判別し状態の変化があったとき、その時刻と機器の名称および動作（ONかOFFか）を記録する。記録項目は26項目である。

3) 故障記録

加速器運転中に何らかの異常があって検出リレーが動作した場合、その時刻と機器名称および故障の種類を赤字で印字記録する。故障検出項目は約40項目である。

2.4 付帯設備

本加速器の主な付帯設備としてオゾン処理装置、垂直照射用コンベヤ、安全監視設備がある。

2.4.1 オゾン処理装置

本装置は照射室内の排気を、活性炭配合固型剤（処理剤）を充填した処理槽内を通すことにより照射排気中に含まれるオゾンや窒素酸化物を除去するための装置である。本装置は処理槽、ブロワーおよび排気ダクト系で構成される。

照射室内で発生したオゾンおよび窒素酸化物は照射室内の空気とともに照射室排気口より排出され、排気ダクトを通って1階の排ガス処理室内の処理槽に導かれる。ここでオゾンは処理剤と反応して分解され、窒素酸化物は処理剤に吸着除去される。

本装置の処理剤の使用量は1800 kgで、最高200 ppmのオゾンを含む空気を処理槽に通した場合にオゾン濃度を5 ppmまで低下させる能力がある。排気用ブロワーの排気量は照射実験終了後に、垂直、水平各照射室へ立入る際の安全性、作業能率を考えて各照射室内の空気を1分間に1回の割合で換気できることを目標として $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。

2.4.2 垂直ビーム照射用コンベヤ

本照射用コンベヤは垂直照射室の外側から8の字形の迷路を通じて照射室内に試料を搬入・搬出する目的で設置された。本コンベヤの駆動用レールの系統図をFig. 7に示す。図にみられるオーバースライダーは、コンベヤ作業室にみだりに人が立入らないようにするためのガラス製シャッターで、大量の試料を処理する場合にはここを開放し、代りに境界柵を立てて照射中の安全を確保する。その他に迷路側から照射室内に人が立入るのを防止するためフットスイッチ、光電管式検知器を出入口に設置し、もしこれらが動作した場合は加速器、コンベヤは停止するように回路が組まれている。

本コンベヤは駆動部、レールおよびチェーン、搬送台車、操作・制御部で構成される。本コンベヤは床面に布設されたレール内の駆動チェーンにより70 cm角のステンレス製試料皿をもつ搬送台車を引張るトウペア方式のコンベヤで、台車をはずせば照射室床上の構造物が何もなくなるので、コンベヤを用いない照射の場合の装置の据付に影響を与えないという利点がある。

本コンベヤの台車とチェーンの脱着は、チェーンに何カ所かあいている凹みに台車に付属のロッドを差し込んだり外したりするだけで簡単に行うことができる。

本コンベヤの仕様は以下の通りである。

- (1) 搬送速度・速度安定度：0.5～15 m/min 連続可変±5%
- (2) 搬送台車数：最高20台
- (3) 搬送重量：台車1台あたり20 kg × 20台；400 kg
- (4) 正逆運動：照射室内レールの範囲内で可能（台車5台まで繰返し照射可能）

2.4.3 安全監視設備

(1) グラフィックパネル

制御盤の中央にあり、加速器本体室、垂直、水平各照射室の遮蔽扉の開閉状況、室内作業スイッチの入切および加速器の状態（高電圧切換装置の入切、高電圧発生、電子流取出、ビームシャッターの開閉）をグラフィック表示する。これにより運転者が現在の加速器の状態を一目で把握することが容易となる。

(2) ITV システム

デュアルビーム方式である本加速器では、制御室と各照射室および作業エリアとが遠く離れているので、制御室にいながら照射室・作業エリアの状態を確認できるように、垂直、水平両照射室内をはじめとして棟内 8ヶ所に監視カメラを設置している。

(3) 放射線モニター

垂直方向照射中の水平照射室内の放射線量計測用のGM管式モニターが1台と、棟内漏洩放射線量測定用の7台の電離箱式モニターが設置されている。水平照射室内のモニターは垂直方向運転時のみ電源がONとなり、設定値以上の線量率では赤色のランプが点灯するとともに警報ブザーが鳴動する。

2.5 加速器の操作と回路特性

2.5.1 運転操作

本加速器では運転準備から電子流取出しまで次のようなステップをたどる。

(1) 運転準備

1) 冷却水ポンプON

本加速器の冷却水は 10 m^3 の貯水槽からポンプで吸い上げられ、高周波M-G, SF₆ガス冷却装置および垂直、水平用の各ビームシャッターを経てまた貯水槽に戻るという循環方式で供給される。独立したクローズドループであるため断水のおそれはないが、水温上昇、不純物濃度上昇に対する注意・対策が必要である。

2) 給排気ブロワーON

給排気ダクトの途中4ヶ所にダンパーがあり、垂直、水平の運転方向の設定に応じて開閉して給排気の流れを制御する。給排気の割合はそのとき照射を行う方向の照射室が9割程度の換気量になるよう調整されている。

3) 制御系・走査回路電源ON

ショーティングロッド、電圧・電流設定器、回転電圧計、ITVシステム、三角波発生器などの電源がON。

4) 高周波M-Gの電動機起動

Y-△起動を行いONから約2分後に定常の回転数、2960 rpmに到達する。

5) 電子源M-G ON

圧力タンク内高電圧部の制御系、電子銃フィラメント、高電圧切換装置の電源が入る。

6) 運転方向設定

垂直方向か水平方向か、照射を行う方向に応じて高電圧切換装置を入切する。

7) 冷却ブロワーON(照射する方向のブロワー)

照射窓冷却用空気流発生

8) SF₆ガス冷却装置ON

圧力タンク内SF₆ガスを循環冷却する。

9) インターロック確認

インターロック表示パネル、グラフィックパネルをよくみて運転開始に問題がないことを確認する。

10) 加速電圧設定選択

自動運転のワンタッチ切換方式を用いると設定した加速電圧に応じて、ショーティングロッド短絡段数、X軸方向走査系出力が自動的に設定される。Table 1に自動設定の場合の運転定数を示す。

(2) 加速電圧昇圧

前述の準備段階を経て高電圧ONのボタンを押すと直流高電圧が発生する。Fig. 8に高電圧系統図で示すように高周波M-G〔誘導電動機(I.M)と直結した高周波発電機(A.G)のセット〕が定常回転している状態で、界磁制御ユニットの出力を強めて界磁電圧を高くすると発電機出力電圧(絶縁変圧器入力電圧→絶縁変圧器出力電圧→コッククロフト・ウォルトン回路入力電圧)が高くなり加速管に印加される直流高電圧が上昇する。

加速電圧の制御は圧力タンク頭部に設けられた回転電圧計の発生電圧をフィードバックすることにより行う。

(3) 電子流取出し

直流高電圧発生回路で発生した高電圧はブリーダー抵抗で分割され、55段の加速管電極に供給される。

加速電圧が所定の設定値に達すると、電子流発生準備完了の表示が点灯する。ここでフィラメント電源をONにして電子源M-Gの電力をSCR制御でフィラメントに供給する。フィラメントが熱せられると熱電子が放出され、加速管内でエネルギーを与えられ、走査コイルでX軸方向に走査されながらチタニウム窓を通して大気中に飛び出す。設定した電子流値に到達したらビームシャッターを開いて試料の照射を行う。

電子流の制御には2通りの方法があるが原則として光伝送システムによりフィラメント電流を増減して、出力電子流を制御する方法を用いる。

2.5.2 回路出力計算

バランス形コッククロフト・ウォルトン回路の出力電圧、リップル電圧は以下の式で表現される。

(1) 出力電圧

出力電圧は V_o は次式で表わされる。(最大定格時)

$$V_o = KV_i - R_i I_o \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$K = 2FN \times \sqrt{2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$F = b/N \cdot \tanh N/b \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで V_i は高電圧回路入力電圧(変圧器出力電圧)でこの場合66 kV、 R_i は系内抵抗値で $3.6 \times 10^6 \Omega$ 、 I_o は出力電子流で最大30 mA、Nは加速段数で12段、bは加速系コンデンサーの容量と浮遊容量の比の平方根である。

(1)式に各定数を代入して出力電子流 I_o を30 mAとして出力電圧を計算すると

$$V_o = 32 V_i - 3.6 \times 10^6 I_o = 2004 \text{ kV}$$

となり、この定数選択で 2MV, 30mA の定格出力が得られることがわかる。

(2) リップル電圧

リップル電圧 V_o' はバランス形の場合、高電圧電極ハット部と圧力タンク間の容量 C' と加速系周波数 f により決定され、次式で表わされる。

$$V_o' = I_o / 2 f C' \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

出力電子流 30mA の場合、リップル電圧 V_o' はピークからピークまでで 25 kV (25 kV P - P) となる。

3. 電子線出力特性

加速器の照射利用において基本的に重要なことは、電子エネルギー及び出力電子流の値の正確さ（確度）とそれらの安定度（再現性・精度）および電子流密度分布などの照射パラメーターである。加速電圧と出力電流の安定度については前報¹⁾で報告したように仕様性能（電圧・電流とも±2%以内）が得られている。本報告では加速電圧、出力電流の校正を行った結果を述べる。また本加速器による照射利用に必要なデータとして電子流密度分布、表面線量率分布を垂直、水平の両方向について測定し、結果をまとめた。深部線量分布については垂直ビーム、水平ビームとも同じ直流高電圧回路を使用（高電圧切換装置で入切）していることから垂直方向についてのみ測定を行った。

その他、水平照射室の広い照射野のいくつかの点で、ビーム波形を測定するとともに、空気中の線量率分布の測定を行った。斜入射の影響や照射試料中の温度上昇の実測例についても述べる。これらの測定方法および結果の概略は以下の通りである。

3.1 加速電圧と出力電流の校正⁴⁾

(1) 加速電圧校正

直流高電圧回路で発生した高電圧はFig. 8に示されるように回転電圧計（GVM）で測定され、操作盤上にある加速電圧デジタルメーターに表示される。このGVMは高電圧に正比例した出力を発生するのでどこか1点を決めて正しい電圧値に校正すれば、あとは原理的に測定全範囲にわたって正しい高電圧値を得ることができる。

加速電圧の校正については色々な方法が試みられているが、本加速器の今回の校正実験に関しては、測定系の問題や加速電圧の範囲等を考慮して、反応のしきい値が1.667 MeVである⁹Be(γ , n)⁸Be核反応を用いて校正を行うこととした。これは電子が物質に衝突したときに発生する制動放射線（連続スペクトルの最大エネルギーが電子加速電圧に相当する）による光核反応で発生した中性子束を間接的に測定し、加速電圧を校正する方法である。⁵⁾

垂直ビームを用いて行った校正実験の概略配置をFig. 9に示す。図のような配置において加速器のチタニウム50 μmのビーム窓およびステンレスターゲット（ビームシャッターで代用）で生じた制動放射線により、Be(50 mm ϕ , 2 mm厚)が照射される。制動放射線の最大エネルギーが核反応しきい値よりも高い場合にはBeから速中性子が発生する。速中性子はBeの下にあるポリエチレン(10 mm厚)で減速された後、銀板(0.3 mm厚)に衝突し銀を放射化する。この放射化された銀(¹⁰⁸Ag)の放出するβ線をGM計数管で測定する。加速電圧を徐々に下げて行くに従ってβ線計数率は減少し、しきい値以下ではGM管計数値は零になる。

加速電圧Vと計数値Nの測定結果をFig. 9に示す。図から推定されるしきい値V₀とV, Nの間には次のような関係がある。

$$N = a (V - V_0)^\alpha \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

指数 α は N と $V - V_0$ を両対数でプロットしたときの傾きで求められ、今回は $\alpha = 2.7$ となつた。この α を用いてプロットし直した直線の読みから回転電圧計の指示値が 1.63 MV のときの発生電圧が、反応しきい値の 1.667 MeV に相当する結果となった。この結果にもとづき回転電圧計出力を調整し、確認実験を行った。

(2) 出力電流の校正

垂直、水平のどちらのビームについても、電子流計測系、制御系の構成は同じであり、出力電流は加速管内電流で表示される。電流校正実験は、走査幅が 60 cm であり電流収集板が小さくてすむことから水平ビームのみを用いて行った。

出力電流校正ではビーム窓から出た電流をほとんど収集できるような大きなアルミニウムターゲットをビーム窓近傍に置いて、ターゲットの収集電流を測定する。一方出力電流の指示値についても、ビーム窓や空気層による吸収分及びターゲット材からの後方散乱損失分を^{6), 7)} 補正して、ターゲット収集電流の計算値を求めた。そして両方の値の比較をもとにして管内電流のメーター指示値を再調整するという手順で校正を行った。

Fig. 10 の図中に水平ビーム照射室における実験配置を示す。走査幅 60 cm の水平スキャンホーンのビーム窓から 20 cm の位置に大きさ 2 m × 1 m、厚さ 5 mm (2 MeVまでの電子電荷はすべて吸収できる) のアルミニウム製ターゲットを置いて電流を測定した。

加速電圧 0.5, 1.0, 2.0 MeV、出力電流 10 ~ 20 mA でターゲットを照射したときの、出力電流のメーター指示値 (i_o) とターゲット電流の測定値 (i_t) との比 (i_t/i_o) と加速電圧との関係を Fig. 10 に示す。50 μm 厚のチタニウム窓、20 cm 厚の空気層での吸収及びアルミニウムターゲットからの後方散乱損失を補正したターゲット入射電流値は 0.5 ~ 2.0 MeV のエネルギー範囲で測定値とよく一致した。これによって出力電流のメーター指示値は正しいことが確認された。

3.2 電子流密度分布

電子流密度は照射場を特性づける基本量であり、特に半導体などの照射で入射電子のフルエンスを必要とする場合に重要である。電子流密度分布の測定は、原研で開発した電子流密度測定器⁸⁾ を用いて行った。電子流密度測定器は 20 mm φ のカーボン製の主吸収体および補正用の副吸収体で構成されており、専用の駆動装置を用いて照射場の X 軸方向 (スキャンホーンの長手方向、主走査方向、以下同様)、Y 軸方向 (X 軸と直角の方向、垂直ビームではコンベヤ進行方向、水平ビームでは上下方向、以下同様) に測定器を一定速度で移動させることにより、自動的に電子流密度分布が測定できる。

測定においては、垂直ビーム、水平ビームの両方とも X 軸方向走査は最大走査幅を与える走査出力で、Y 軸方向は走査出力を零の走査条件に設定した。加速電圧は、0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 MeV の各電圧で、ビーム電流は電子流密度測定器の過熱を避けるため、0.2 ~ 1.0 mA の低電流値で照射を行った。

(1) 電子流密度分布の測定結果

ビーム窓下 20 cm (所内照射利用標準位置) における垂直ビームの Y 軸方向電子流密度分布の測定結果を Fig. 11-a に, X 軸方向分布の測定結果を Fig. 11-b に示す。同様に, ビーム窓下 30 cm における Y 軸方向分布を Fig. 12-a, X 軸方向分布を Fig. 12-b, ビーム窓下 50 cm における Y 軸方向分布を Fig. 13 に示す。

Y 軸方向の電子流分布のビーム窓からの距離による変化を見れば, 面積の大きい試料を均一に静止照射するためにはビーム窓からの距離を大きくする必要があることがわかる。

Table 2 に垂直ビームの Y 軸の電子流密度分布をもとに得られる照射利用に必要な基本データを示す。参考として水平ビームの電子流密度分布のピーク値も付した。

水平ビームの場合の Y 軸方向の電子流密度分布は Fig. 4-b のスキャンホーン配置に見られるように, 上下方向に電子流密度測定器を移動させて測定を行った。水平ビームの高さは床面より 1750 mm である。水平ビームの XY 両方向電子流密度分布測定結果を Fig. 14-a (ビーム窓からの距離 30 cm) と Fig. 14-b (ビーム窓からの距離 50 cm) に示す。

X 軸方向の電子流密度分布の測定結果において, 特に垂直ビームの場合, スキャンホーンの中心部と比較して両端部の電子流密度の低下が見られる。これは垂直ビームの走査幅が 120 cm であり, 走査端部では入射面が最大 30° になるため, ビーム窓および空気層での散乱が中心部よりも大きいことに帰因する。

(2) 垂直ビームと水平ビームの比較

Fig. 15 にビーム窓からの距離 30 cm における垂直および水平ビームの電子流密度分布測定結果の比較例を示す。走査幅が水平ビームでは垂直ビームの場合の 1/2 であるため, 同一距離, 同一ビーム電流の場合, 水平ビームの電子流密度は垂直ビームの 2 倍の値となると考えられる。そして実際に Fig. 15 に見られるように, 水平ビームの電子流密度を 1/2 倍した分布は, 垂直ビームの分布とはほぼ一致している。横軸のマイナス側で両者の間に多少の違いが見られるが, これは水平ビーム窓下側のスキャンホーン支持枠による散乱の影響によるものと思われる。しかしその違いは小さいので, Y 軸方向電子流密度分布の半値幅など, Table 2 の値はそのまま水平ビームにも適用できる。また線量率分布についても同様と考えられる。

3.3 深部線量分布

電子線は X 線, γ 線に比べて透過力が小さく, 照射試料内での深さ方向の吸収線量分布（深部線量分布）は, 数百 keV から数 MeV のエネルギー範囲にわたって Fig. 16 に見られるような形状を示す。また深部線量分布は物質の原子番号によって異なる。このため同一条件の照射であっても, 試料の厚さや種類によって平均吸収線量は異なった値となる。

本加速器を用いた一般照射利用では, 基準となる物質中の深部線量分布について, 表面 (入射部) の吸収線量と同一の吸収線量を示す深さ (有効飛程: Re) までの平均吸収線量の計算値を, 線量の代表値として用いている。この代表値の算出のもとになる深部線量の測定では, 基準物質として三酢酸セルロース (CTA)⁹⁾ を用いた。CTA は化学式が $C_{12}H_{16}O_8$, 実効原子番号 6.7, 比重 1.31 のフィルム線量計である。

本加速器における深部線量分布は、前述のように垂直および水平ビームのどちらでも同一の分布を示すはずであるので、測定は垂直ビームについてのみ行った。測定には幅が 8 mm、厚さ 0.125 mm の CTA 線量計を数 cm の長さの短冊に切断し、それを電子線照射用ポリエチレン製ホルダーの中へ、各電子エネルギーの最大飛程以上の厚さになるように積層したものを照射試料として用いた。積層枚数は 0.5 MeV で 15 枚、2 MeV で 75 枚程度であり、それらを照射した後に分光度計で 1 枚ずつ吸光度増加量を測定し、この増加量を吸収線量に換算して深部線量分布を得た。

照射は、垂直ビームのビーム窓下 20 cm の高さで行い、静止照射の場合は照射試料を X 軸方向に平行に置き、ビーム電流 1 mA で 30 ~ 90 sec 照射した。照射の開始および終了にはビームシャッターの開閉動作を用いた。移動照射の場合は、ビーム電流 5 mA、コンベアスピード 1 m/min でビーム窓下を 1 回通過させて照射を行った。

0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 MeV の 5 種類の加速電圧における静止および移動照射の場合の深部線量分布を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。静止照射において電子エネルギーが高いほど表面線量率 (kGy / sec・mA) が高いのは、主として電子エネルギーが高いほどビーム窓および空気層での散乱が少なく、中心部の電子流密度が高くなるためであり、電子エネルギーにはほぼ比例して飛程も増加するため、深部線量分布の面積すなわち単位面積あたりのエネルギー吸収量も増大する。

深部線量分布の形状は同一加速電圧で照射しても、静止照射と移動照射の場合を比較すると、試料に入射する電子の入射角度分布の違いの影響で異なった分布を示す。その違いは、移動照射の場合の方が平均入射角が大きいため、ピーク線量の位置が浅くなり最大飛程も小さくなる傾向として示される。この分布形状の違いは低エネルギーになるほど、散乱が大きいため著しい。

また静止照射あるいは移動照射のいずれの場合でも、スキャンホールの中心部と端部（垂直ビームの場合中心から最大 60 cm の位置）では、入射角度が異なるため、分布の形は多少異なる。本加速器の垂直ビームの場合は、Fig. 4-a に示すように走査端部への入射角度は 30° 近くになるので深部線量分布の形状の差異は顕著である。Fig. 18 に移動照射の場合の中心部と端部における深部線量分布を比較した結果を示す。図に示すように端部の方がピーク深さが浅く、吸収線量も少ない傾向があり、この傾向はエネルギーが低いほど顕著である。

電子線の吸収線量は、このほか試料の原子番号、厚さ、物質の状態、後方散乱、周囲構造物からの散乱などに依存するため、個々の照射条件ごとに厳密に吸収線量を決定するのは困難である。通常の照射利用に際しては、有効飛程厚さまでの平均吸収線量を各電子エネルギーごとに算出した値を基準値として用いている。この基準の吸収線量値が有効に適用できる条件は以下の通りである。

- ① 試料の原子番号が CTA に近い（大部分のプラスチックは適合）
- ② 試料がスキャンホールの中心部にセットされている。
- ③ 後方散乱や周囲構造分の散乱線がほとんど無視できること（たとえば薄い試料をステンレスのコンベヤパレット上にそのまま載せて照射すれば、ステンレスからの後方散乱の影響で吸収線量は大きくなる。照射容器、試料支持台などについても、その形状、大きさにより吸収線量に影響を与える）。

④ 試料厚が有効飛程 R_e にほぼ等しいこと。

上記の条件が満されている場合は、試料の吸収線量は基準値とほぼ等しいといえるが、これらの条件が満されない場合は、試料の実際の吸収線量は基準値と異なった値となる。

Table 3 に垂直ビームの場合の、ビーム窓下 20 cm と 30 cm における、静止照射と移動照射の場合の平均吸収線量率基準値を示す。本表には移動照射の場合、ビーム電流 1 mA、コンベヤ速度 1 m/min でビーム窓下を 1 回通過したときの線量が示され、静止照射の場合は 1 mA で 1 秒間照射したときの線量が示されている。たとえば加速電圧 2 MeV の移動照射、ビーム窓下 20 cm では有効飛程は 0.67 g/cm^2 、最大飛程は 1.1 g/cm^2 、表面線量は 7.6 kGy、平均吸収線量は 9.7 kGy である。これから吸収線量 10 kGy を照射しようとする場合には 0.97 m/min のコンベヤ速度で 1 回照射すればよいことがわかる。他の電子エネルギーについても同様である。静止照射の場合の平均吸収線量率は Y 軸方向の電子流密度分布のピーク値を示すが、実際の照射においては試料面内の線量率分布を考慮する必要がある。

水平ビームについては走査幅が 60 cm であることから、ビーム窓からの距離が 20 cm、30 cm の位置の線量率は Table 3 に示す垂直ビームについての値の 2 倍の数値となる。

3.4 表面線量率分布

CTA フィルム線量計を用いて得られる X 軸および Y 軸方向線量分布は、電子流密度測定器で測定した電子流密度分布と良く似た形の分布を示すが、斜め入射や散乱線の影響などにより、電子流密度分布と試料の表面線量率分布とは特に走査端部において差異が現われると考えられる。

表面線量率分布の測定は垂直ビームを用いて、CTA フィルムを後方散乱の少ない木材の上に密着させて照射することにより行った。Y 軸方向の線量率分布は静止条件で、X 軸方向の表面線量率分布はコンベヤ使用条件でそれぞれ照射した。ビーム窓下 20 cm における Y 軸方向表面線量率分布を Fig. 19-a に示す。これらの分布は CTA フィルムに沿う線量を専用リーダーで読み取ることにより得られる。小さい凹凸は CTA の厚みのバラツキによると思われる。このビーム窓下 20 cm における表面線量率分布を Fig. 11-a に示す電子流密度分布と比較すると、Y 軸方向分布の半値幅に次のような差が見られる。

垂直ビーム Y 軸方向分布半値幅（窓下 20 cm）		
エネルギー	表面線量率分布	電子流密度分布
2.0 MeV	8.1 cm	7.8 cm
1.5 MeV	10.1 cm	9.5 cm
1.0 MeV	14.8 cm	12.7 cm
0.5 MeV	27.6 cm	19.9 cm

以上のように 1.5, 2.0 MeV のような高エネルギー領域では、CTA 表面線量率分布も電子流密度分布もそれほど変わらないが、1.0 MeV では少し差が見られるようになり、0.5 MeV になると大きく異なる分布形を示すことがわかる。この両者の分布形状の比較を Fig. 20 に示す。この差異は散乱や斜め入射の影響にもとづくものと思われる。このように低エネルギー領域で、表面線量率分布と電子流密度分布とは大きな違いを示すが、深部線量分布を Y 軸に沿って測定しそ

の面積分布にもとづく分布図を作成すれば、その分布は電子流密度分布と似たものとなると思われる。

Fig. 19-b にビーム窓下 20 cm における X 軸方向表面線量率分布を示す。これは移動照射で求めた分布であるので Fig. 11-b の X 軸方向電子流密度分布と単純には比較できないが、表面線量率分布の場合は、走査幅 120 cm の範囲で 0.5 MeV の場合を除きほぼ均一な分布が得られることがわかる。これは電子流密度分布の場合と異なり、吸収線量分布の場合は、端部において斜め入射しても、試料の厚み方向への寄与が増す関係から線量値としてはそれほど低下しないということによるものと思われる。0.5 MeVにおいて、中心より 50 cm 位の距離から平坦度が低下するのは、エネルギーが低いためチタニウム製ビーム窓や空気層での散乱・吸収が大きくなることに原因があると思われる。

窓下距離 30 cm における同様測定例を Fig. 21-a, Fig. 21-b に示す。

水平方向の場合はコンベヤや適当な照射台がないので照射窓枠 ($d = 3 \text{ cm}$) および支持枠 ($d = 13 \text{ cm}$) に CTA を直接、十字形に張って静止照射での X 軸、Y 軸分布を測定した。その結果を Fig. 22 ($d = 3 \text{ cm}$) と Fig. 23 ($d = 13 \text{ cm}$) に示す。X・Y 両軸を 1 つの図に収める必要から中心からの距離は二重軸で示す。 $d = 3 \text{ cm}$ (Fig. 22) の Y 軸分布の中心付近の三つ山形はビームスポットの強度分布を反映した形であり、X 軸分布における両肩部の盛り上りは、走査用三角波のピーク部の立ち上り立ち下りに関係している。ビーム窓から出た直後はこのような分布を示しているのが、ビーム窓からの距離が大きくなるにつれて平坦となり、窓からの距離が 13 cm になると Fig. 23 に示すように、走査幅の範囲でほぼ均一な X 軸分布を示すようになる。

3.5 水平ビーム照射室の線量率分布

通常の照射用電子加速器では垂直ビームが用いられているため、照射場の奥行が短いが、本加速器の水平ビームの場合、ビーム窓から対向する遮蔽壁まで 5.7 m の距離があり、また水平方向の照射場も広い。この広い照射場の特徴を生かして、照射室内の空気中の線量率分布の測定を行った。また線量率および電子流密度のビーム窓からの距離による減衰、ビームパターンの波形変化などについて測定した。

まず照射室内の線量率分布については、表面線量率分布測定と同様の方法で測定した。アルミニウム製の枠に CTA フィルムを 20 cm 間隔で縦横に張りめぐらしたもの（近距離用の枠は縦 1 m × 横 2 m、遠距離用は縦 3 m × 横 4 m の枠）を 1 つのセットとして、距離を数カ所変化させて線量率分布を求めた。そして距離が遠く離れて線量率が低くなる場所については、CTA ではなくラジオクロミックダイフィルム (RCD) や熱ルミネッセンス (TLD) 線量計を用いて測定した。これらの線量率分布をもとにして等線量率分布図を作成した。Fig. 24 に 2 MeV, 1 mA における Y 軸方向（床面から中心軸までの高さ 1.75 m）の空間等線量率分布を示す。また Fig. 25 に X 軸方向（水平面：床面に平行な面）の等線量率分布を示す。図に示したのは両平面とも 2 MeV の例であるが、エネルギーが 1.0, 0.5 MeV と低下するのに従って、等線量率分布は丸みをおびてきて、散乱の効果が大きくなることを示す結果となった。

電子流密度と線量率の距離分布は、電子流密度測定器と CTA フィルムを中心軸にセットして

距離を何点か変えて、静止照射することにより求めた。Fig. 26に水平ビーム距離分布を示す。実線（塗りつぶしたマーク）が電子流密度で、点線がCTA線量率である。線量率一距離分布において0.5 MeVでは1.6 m付近、1.0 MeVでは4 m付近で急激な低下がみられるのはそれぞれのエネルギーの空気中の最大飛程に近くなっているためのバラツキと空間電荷の影響によるものと思われる。エネルギーが高くてビーム窓からの距離が近い場合には、電子流密度とCTA線量率のカーブはほぼ平行しているが、これは入射角度や散乱の問題が無視し得る範囲については適当な係数を乗ずることにより、電子流密度と線量率の変換が可能であることを示している。

Table 4に2 MeVと1 MeVの場合の、電子流密度とCTA線量率とのビーム窓からの距離による減衰を示す。

ビームパターンの波形の距離による変化については、電子流密度測定器の収集ビーム電流波形をシンクロスコープで観測することにより調べた。前述のように本加速器の走査はX軸方向に200 Hzの三角波を用いているからビームスポットがビーム窓中心付近では400回/secの割合でパルス的に試料にあたることになる。このビームパターンの波形の距離による変化の例をFig.27に示す。ビーム窓からの距離が20 cmの位置のビームプロファイルは立ち上りも立ち下りもはっきりとした半波状であるが、ビーム窓からの距離が遠くなるにつれてビームスポットが散乱拡大していくため、200 cm離れた場所では脈流のようになりほぼ連続的ビームと見なし得る位になる。

試料や照射系によっては線量率効果等で、ビームの走査によるパルス的照射の影響がある場合も考えられるので、ビームプロファイルにも注意が必要である。

3.6 試料の温度上昇

原子炉や人工衛星用の各種材料および半導体デバイスの照射効果試験における大線量照射では、短時間で大線量の照射を行うためビーム電流を増すと、試料の温度上昇が問題になる。

電子加速器で照射される試料の単位面積あたりの吸収エネルギーQは次式で示される。

$$Q = \bar{E} \cdot \bar{I} \cdot f \cdot t \quad (\text{J/cm}^2) \quad \dots \dots \quad (6)$$

\bar{E} ：入射電子の平均エネルギー (MeV)

\bar{I} ：平均入射電子流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

f：エネルギー利用効率

t：照射時間 (sec)

ここでエネルギー利用効率fは、試料の厚さ、試料の後方散乱係数、放射収率、基材物質などを考慮して決定される係数で、試料の厚さが最大飛程以上であっても、原子番号の高い試料の場合には後方散乱のため1.0よりも小さい値となる。しかしプラスチック試料などで、CTA深部線量分布を利用して試料のfを決定する場合、最大飛程分の厚みがあればfを1.0と見なしてもさしつかえない。

本加速器の垂直ビームを用いて、加速電圧2 MeV、ビーム電流1 mAでビーム窓下20 cmの位置で静止照射する場合、電子流密度ピーク値はTable 2から $0.74 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であるので、これを(6)式に入れて計算すると試料の吸収エネルギーは次のようになる。

$$Q = 2 \times 0.74 \times f \times t = 1.48 ft \quad (\text{J/cm}^2)$$

ここでエネルギー利用効率 f を 1.0 と仮定すると、比熱が 1.0 の試料の場合、単位体積あたり 1 秒間に $0.35\ (^{\circ}\text{C})$ の温度上昇が起る。最高出力の 30 mA の場合は約 $10\ (^{\circ}\text{C/sec})$ の温度上昇率となる。実際には伝熱・対流および輻射による放熱が大きくなるので、温度が高くなるとともに温度上昇率は低下していくが、比熱が 1.0 よりも小さい試料が多いので、初期の温度上昇率はさらに大きくなる。

Fig. 28 に温度上昇パターンの 1 例を示す。これはアルミニウム板（試料の大きさ $3\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 厚さ 2 mm , 利用効率 f は約 0.7）を、ビーム窓からの距離 18 cm の位置に、水平ビームの X 軸に平行に吊して照射した例であるが、上昇温度飽和値はこの程度の温度領域ではビーム電流に比例して高くなることがわかる。このように、静止した条件で連続的に照射する場合は、試料の過熱を避けるため、ビーム電流を低く抑えるか、間欠的照射に切り替えるかもしくは何らかの冷却を行う必要がある。本加速器垂直ビームでは、 2 MeV , 4 mA の静止照射において遮蔽カバー用の鉛が一部溶けたことがあるので、 2 MeV で鉛カバーを用いる静止連続照射の場合は、ビーム電流の上限を 3 mA としている。

Fig. 29 に連続照射と間欠照射（コンベヤ移動による繰返し照射あるいはビームシャッターを用いた断続照射）の到達飽和温度の実測例を示す。照射と非照射の交互の繰返しにより飽和温度に差が見られる。電流を低く抑えるか間欠的に照射を行うかのどちらを選択するかは、試料の寸法、照射の能率および上限温度などの要求を考慮して決定される。

半導体のような試料の場合は試料全体が均一に発熱すると考えて良いと思われるが、最大飛程に近い厚さの固体絶縁物試料の場合は、内部の蓄熱、温度分布の問題がある。Fig. 30 に 1 cm 厚さのポリエチレン内部の温度上昇の測定例を示す。図に示すように表面に近いポリエチレン内部で温度上昇率が最も高くなる。初期の温度上昇率の大きさは深部線量分布から得られる各深さでの線量率にはほぼ比例することがわかる。

厚い絶縁物では強制冷却によっても照射中の温度制御は難しいが、薄い試料あるいは熱伝導の良い試料については、水冷の試料台を用いることより飽和温度をかなり下げることができる。本加速器の垂直ビームでは、静止照射用の水冷却板（ステンレス製、長さ 160 cm , 幅 70 cm ）を用意している。試料を置いてないときの冷却板の表面飽和温度とビーム電流の関係を Fig. 31 に示す。電流が小さいときは飽和温度はビーム電流に比例して上昇するが、ビーム電流が高くなると正比例（図に示す点線）の値よりも飽和温度は小さくなる。この冷却板を用いることで温度上昇を抑制できるが、試料面と冷却板の密着度およびその照射中の変化について注意する必要がある。またコンベヤによる移動照射の場合にも用いることが可能な冷却板の必要性も増しており検討課題となっている。

4. あとがき

本加速器の設置以来4年あまりを経過した。この間、デュアルビームタイプという前例のない構造のために、水平ビーム照射系に関するいくつかのトラブルがあったが、現在はこれらの初期故障もなくなり、安定した運転が維持できる段階となってきた。

装置の利用の面からみると、照射運転の開始初期には制御室と照射室がかなり離れているため、利用者および運転担当者に多少とまどいがあったが、その後装備されたインターフォン、ITVなどの活用により、この問題はほぼ解消した。

これまでの運転経験、照射利用状況などを考慮して今迄に次の2点の改良を行った。1点は垂直ビーム照射室床の過熱対策である。コンベヤ照射の際は1つの台車がビーム窓下を通過してから次の台車が来るまでの間、床面に電子ビームが直接あたり過熱する場合があるので、コンベヤレール部分を除くビーム窓下の1.5m×3.0mの範囲にステンレス製の水冷却箱を埋め込んだ。これにより大ビーム電流によるコンベヤ照射の要望にこたえられるようになった。もう1つは、データロガーの変更である。パソコンとA/D変換器を利用することにより、データやコメントなども取り込んだ完全な運転日誌を作成できるよう改良した。

今後の課題としては、寸法の大きい試料や試料数の多い照射の際に必要なコンベヤ自動往復機能の充実、試料の被照射量の同時モニタリングおよび実施記録プリント、照射中の試料の温度モニタリングや温度コントロールの簡便な方法の開発などがあり、一部検討を進めている。

ここに報告した照射利用にかかわる各種データは、垂直および水平の両ビームについて標準的な照射条件における値をまとめたものであるが、今後は照射試料の種類、厚さなどをパラメータとしたときの照射データを収集するとともに、それらのデータを組み合わせて個々の依頼試料ごとに必要線量を自動制御で照射できる方法を確立することが課題である。

謝　　辞

本加速器の設置および出力特性の測定実験において、協力を戴いた当研究所照射施設課 須永博美氏、上松敬氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 四本, 金沢, 春山, 上松, 水橋, 須永, 鶩野, 田村: JAERI-M 84-032 "2 MeV, 60 kW, デュアルビーム形電子加速器照射施設" (1984)
- (2) 四本, 金沢, 春山, 上松, 水橋, 須永, 鶩野, 田村: 第18回理工学における同位元素研究発表会要旨集 P153 (1981)
- (3) 田村, 四本, 金沢, 坂本, 水沢, 谷口: 同上 P154
- (4) 金沢, 春山, 上松, 四本, 田中: 同上 P155
- (5) 須永, 水橋, 四本, 田中, 田村: JAERI-M 82-142 "高崎研2号加速器(3 MeV, 25 mA電子加速器)の概要と電子線出力特性" (1982)
- (6) Tabata T., Ito R. and Okabe S. : Nucl. Inst. Meth. 94, 509 (1971)
- (7) Tabata T. and Ito R. : Nucl. Inst. Meth. 127, 429 (1975)
- (8) Tanaka R., Mizuhashi K., Sunaga H. and Tamura N. : Nucl. Inst. Meth. 174, 201 (1980)
- (9) 田中, 三友, 須永, 松田, 田村: JAERI-M 82-033 "CTA線量計マニュアル" (1982)

Table 1 Operational parameter in AUTO mode operation of the accelerator

Acceleration voltage (MV)	V e r t i c a l				H o r i z o n t a l				
	X-SCAN(%)	Y-STEER(A)	Focus(A)	S.R. No. S.R. counts	Bleeder current(μ A)	X-SCAN(%)	Y-STEER(A)	Focus(A)	
0 . 5	1 5 . 4	0 . 4 5	1 . 0	3 5	7 6	1 0 . 7	0 . 2	0 . 7 5	3 5
0 . 6	1 7 . 1	"	"	3 5	1 1 4	1 1 . 8	"	"	2 7 6 0
0 . 8	2 0 . 8	"	"	2 6	8 9	1 4 . 3	"	"	3 5
1 . 0	2 4 . 0	"	"	1 5	7 8	1 6 . 6	"	"	2 7 6 0
1 . 5	3 1 . 8	"	"	1 1 8 0	"	9 1	2 1 . 6	"	1 4 6
2 . 0	4 0 . 2	"	"	"	1 2 8	2 8 . 3	"	"	2 0 2

X-SCAN : Scanning coil input

Y-STEER : Steering coil input

Focus : Focus coil input

S.R. : Shorting rod

Table 2 Parameter of beam current density distribution
at the normal direction to beam scanning (Y-axis)

20 cm: Distance from beam window Beam current 1mA

	0.5 MV	0.8 MV	1.0 MV	1.5 MV	2.0 MV
① Peak ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	0.24	0.35	0.44	0.61	0.74
② Flux ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)	1.50 E12	2.18 E12	2.75 E12	3.81 E12	4.62 E12
③ Fluence (cm^{-2})	1.76 E13	2.21 E13	2.34 E13	2.49 E13	2.58 E13
④ 1/e range (cm)	24.6	18.5	15.7	11.6	9.5
⑤ 1/2 range (cm)	19.9	15.0	12.7	9.5	7.8
⑥ Horizo. ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	0.45	0.66	0.81	1.18	1.39

30 cm: Distance from beam window

	0.5 MV	0.8 MV	1.0 MV	1.5 MV	2.0 MV
① Peak ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	0.15	0.21	0.26	0.37	0.46
② Flux ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)	0.94 E12	1.31 E12	1.62 E12	2.31 E12	2.87 E12
③ Fluence (cm^{-2})	1.56 E13	2.01 E13	2.12 E13	2.31 E13	2.29 E13
④ 1/e range (cm)	38.5	28.9	24.2	17.8	14.1
⑤ 1/2 range (cm)	30.3	23.1	19.6	14.4	11.7
⑥ Horizo. ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	0.27	0.42	0.51	0.74	0.90

- ① Peak ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) : Peak value of current density
- ② Flux ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$) : Electron flux density
- ③ Fluence (cm^{-2}) : Integral flux density at conveyer speed 1m/min
- ④ 1/e range (cm) : Width of current density distribution
at 1/e of peak value
- ⑤ 1/2 range (cm) : Width of current density distribution
at half of peak value
- ⑥ Horizo. ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) : Peak value of current density of horizontal beam

Table 3 Standard value of vertical beam irradiation at 1mA

Distance 20 cm	Conveyor use (kGy/pass at 1m/min)						Fixed irradiation (kGy/sec)					
	2.0 MV	1.5 MV	1.0 MV	0.8 MV	0.5 MV	2.0 MW	1.5 MW	1.0 MW	0.8 MW	0.5 MW	0.5 MV	
① D_{ave} (kGy)	9.70	10.50	11.70	12.90	12.10	2.01	1.74	1.43	1.22	0.94		
② R_e (g/cm^2)	0.67	0.46	0.24	0.16	(0.05)	0.71	0.49	0.27	0.19	0.09		
③ D_s (kGy)	7.60	8.20	10.00	10.66	12.10	1.49	1.34	1.15	0.95	0.84		
④ D_P (kGy)	11.10	11.90	12.70	14.36	12.70	2.36	2.06	1.62	1.41	1.00		

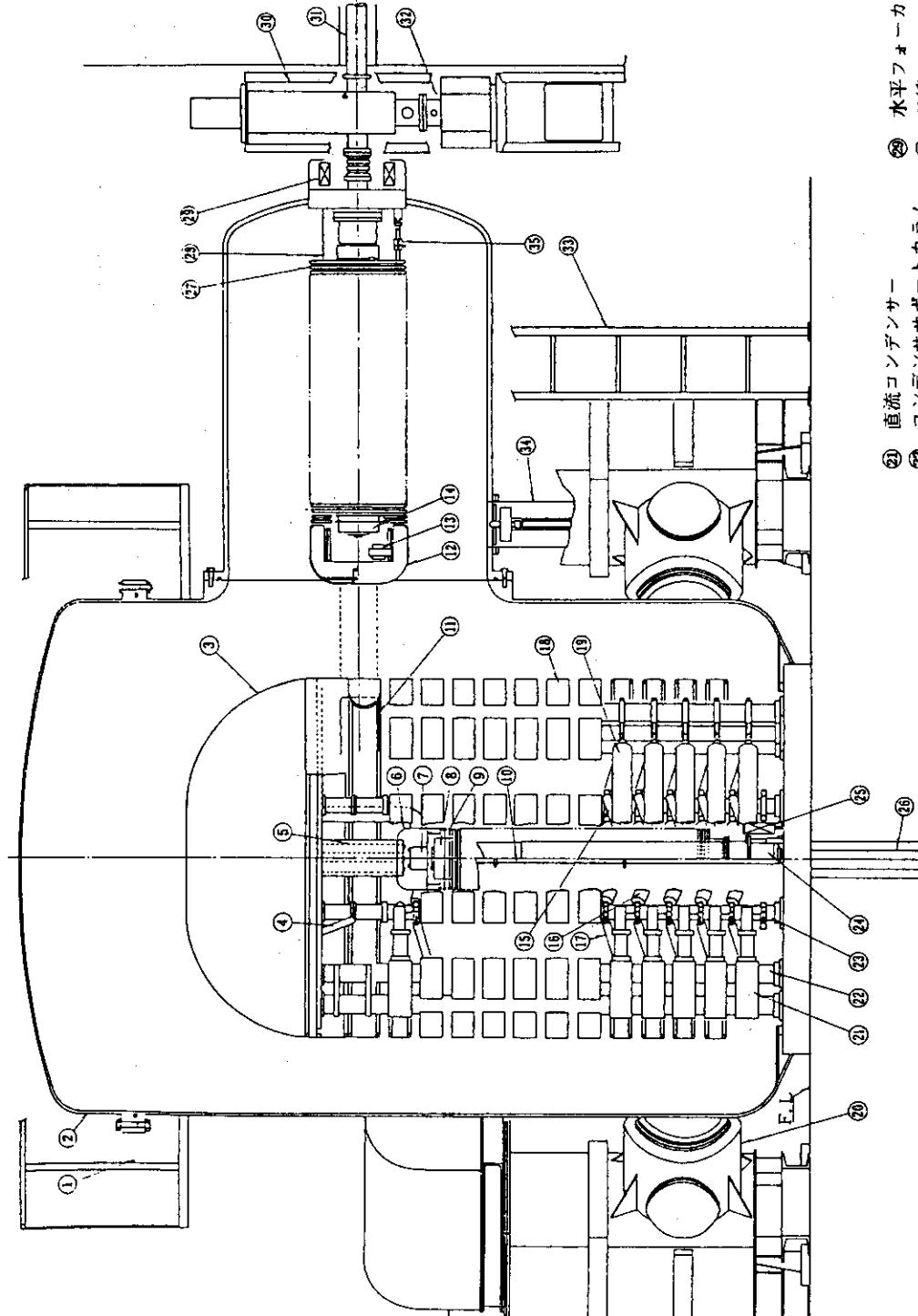
Distance 30 cm	Conveyor use (kGy/pass at 1m/min)						Fixed irradiation (kGy/sec)					
	2.0 MV	1.5 MV	1.0 MV	0.8 MV	0.5 MV	2.0 MW	1.5 MW	1.0 MW	0.8 MW	0.5 MW	0.5 MV	
① D_{ave} (kGy)	8.80	10.00	11.20	11.73		1.23	1.06	0.80	0.72	0.56		
② R_e (g/cm^2)	0.66	0.44	0.23	0.14		0.70	0.48	0.28	0.18	0.07		
③ D_s (kGy)	7.00	8.00	9.60	10.48	13.28	0.91	0.77	0.58	0.54	0.50		
④ D_P (kGy)	10.00	11.30	12.30	12.46	13.28	1.44	1.25	0.95	0.83	0.57		

- ① D_{ave} : Average dose
 ② D_s : Surface value of depth dose curve
 ③ D_P : Peak value of depth dose curve
 ④ R_e : Effective range

Table 4 Relationship between beam current density and distance
from the beam window. (Horizontal beam)

Distance (cm)	Acceleration Voltage 2.0 MV		Acceleration Voltage 1.0 MV	
	Dose rate (Gy/sec)	Beam current density (μA/cm²)	Dose rate (Gy/sec)	Beam current density (μA/cm²)
20	2.29×10^3	1.39	1.68×10^3	0.81
30		0.90		0.51
40	0.95 //		0.66 //	
50		0.43		0.23
60	0.53 //		0.34 //	
70		0.26		0.13
100	0.21 //	0.14	0.14 //	0.07
150	0.11 //	0.06	6.40×10^1	0.03
200	0.61×10^2	0.03	3.72 //	0.01
300	0.25 //	0.01		

Measurement point : 1,750 mm at floor level
Beam current : 1mA



- | | | | |
|------------------|----------------|----------------|--------------|
| ① 作業台 | ⑦ 垂直フィラメントトランス | ㉑ 直流コンデンサー | ㉗ 水平フオーカスコイル |
| ② 圧力容器 | ⑧ 垂直加速管 | ㉒ コンデンササポートカラム | ㉘ X線シャッタ |
| ③ 高圧ターミナルコロナシャード | ⑨ 垂直加速管フープ | ㉓ 抵抗サポートカラム | ㉙ 水平方向ビームライン |
| ④ 限流抵抗 | ⑩ ファイバ支柱 | ㉔ 電子源用 MG | ㉚ 作業台 |
| ⑤ 限流抵抗 | ⑪ 高電圧切換装置 | ㉕ 垂直フオーカスコイル | ㉛ 接地装置 |
| ⑥ 垂直電子源コロナシャード | ⑫ 水平電子源コロナシャード | ㉖ 垂直方向ビームライン | ㉜ 短絡装置 |
| | ⑬ 水平電子源トランス | ㉗ 水平加速管フープ | |
| | ⑭ 電子源カラム起電抵抗 | ㉘ 水平加速管フープ支持板 | |
| | ⑮ コンデンサ保護抵抗 | ㉙ 水平加速管フープ | |
| | ⑯ 整流器保護抵抗 | ㉚ 水平加速管フープ | |
| | ⑰ シールドフープ | ㉛ 水平加速管フープ | |
| | ⑱ 整流器 | ㉜ 短絡装置 | |
| | ⑲ 電源トランス | | |

Fig. 1 Cross sectional view of the accelerator
(JAERI-M 84-032 より引用)

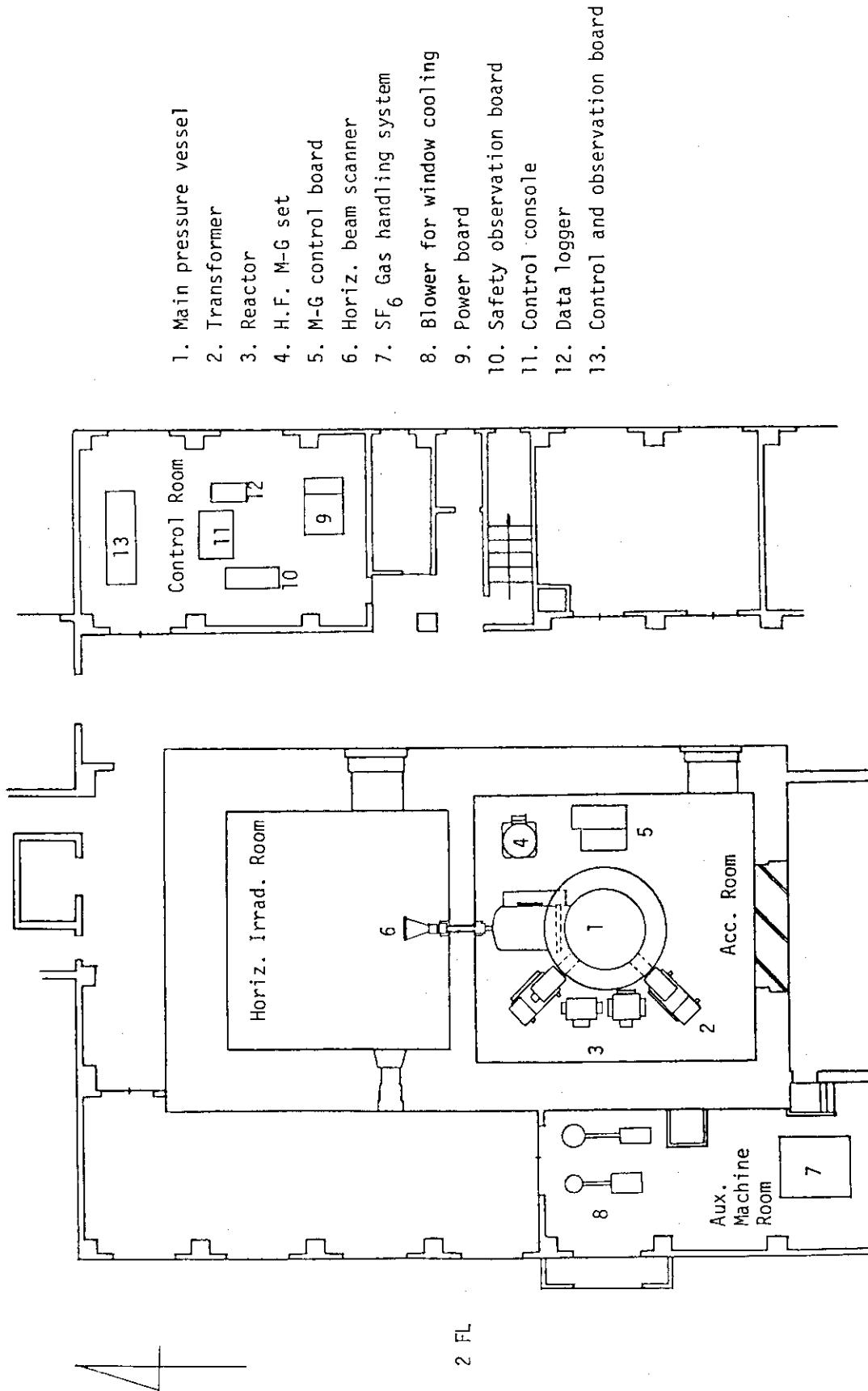


Fig. 2 Arrangement of the accelerator in the facility (JAERI-M 84-032より引用)

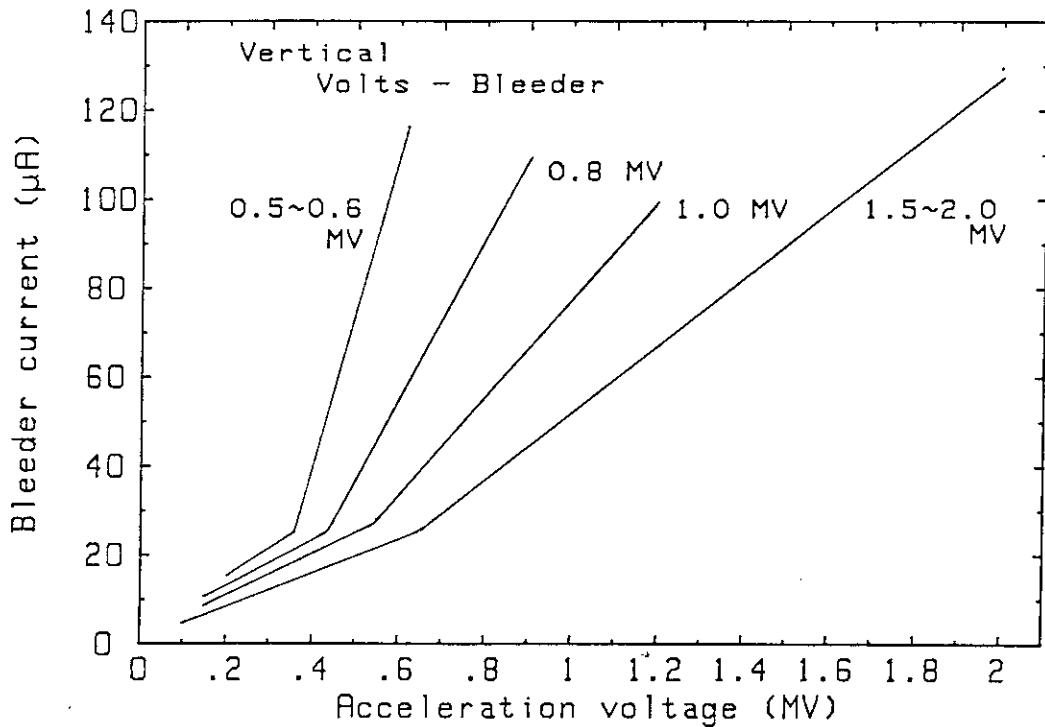


Fig. 3 — a Vertical acceleration tube

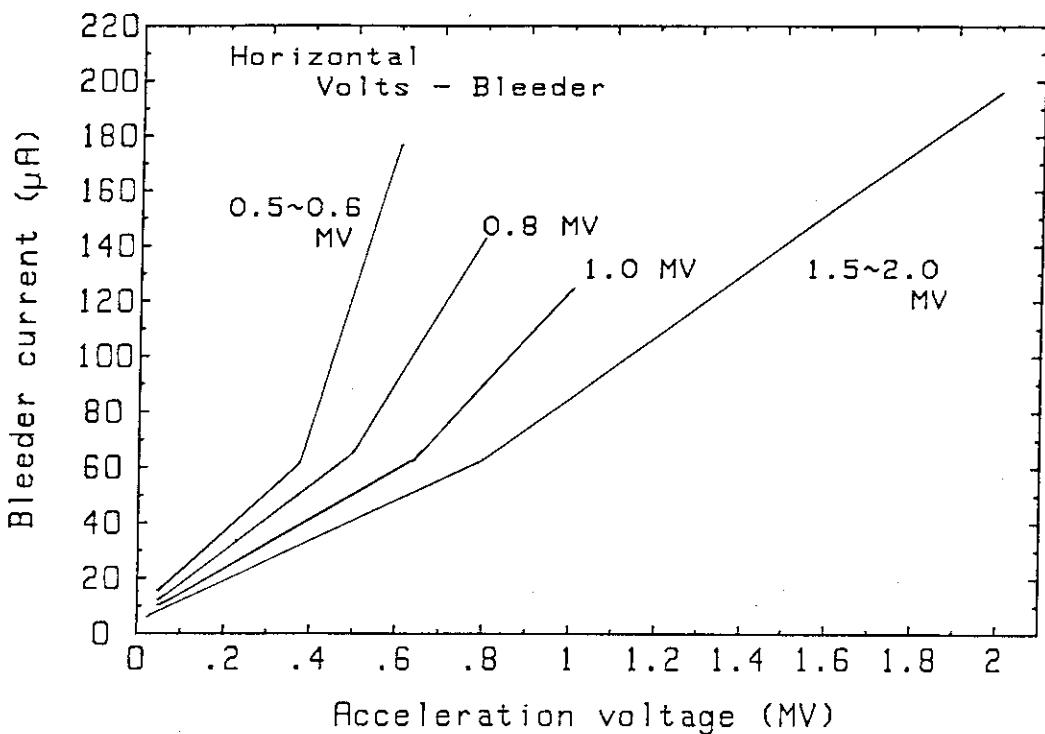


Fig. 3 — b Horizontal acceleration tube

Fig. 3 Relation between the acceleration voltage and the bleeder current

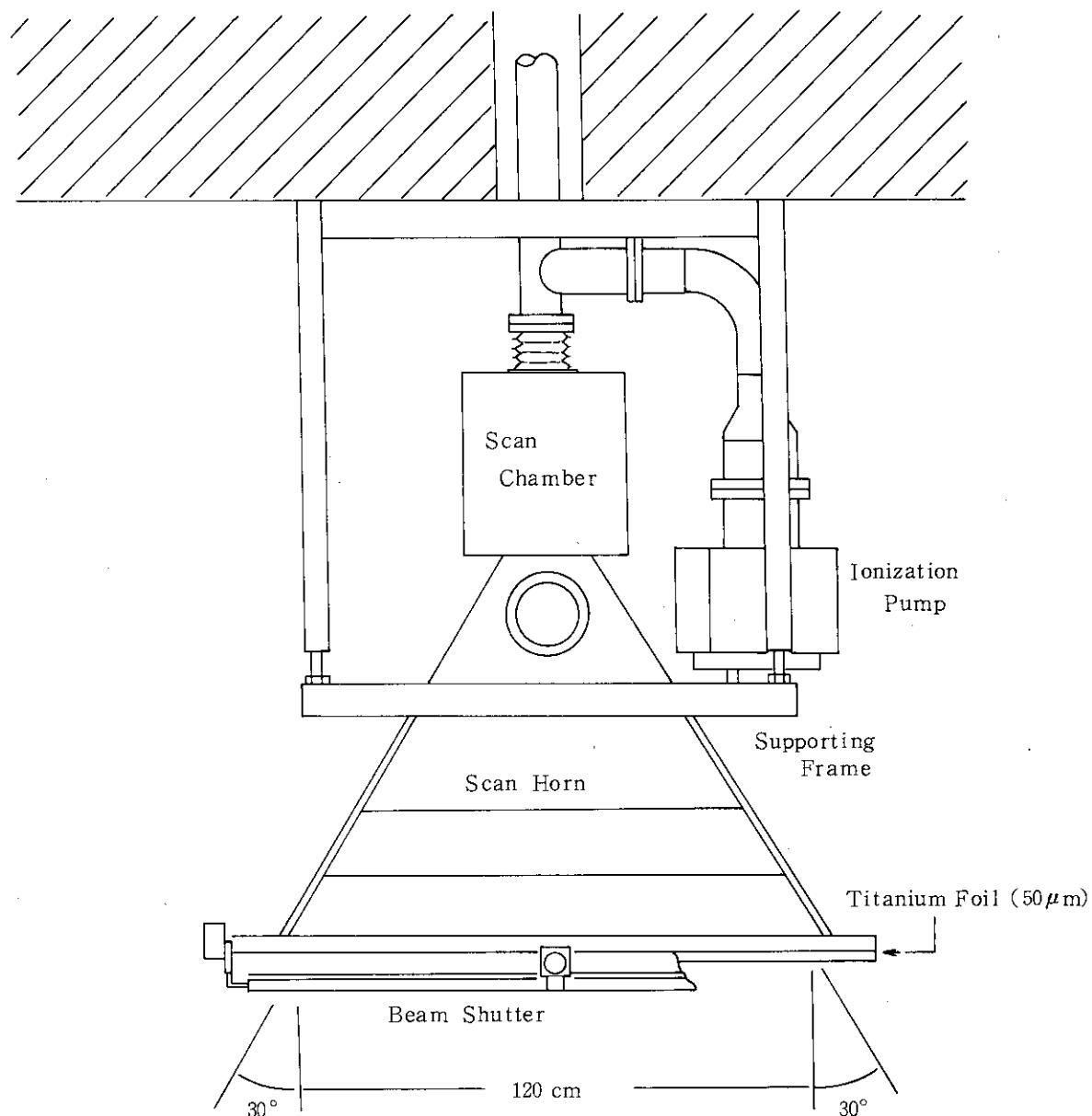


Fig. 4 — a Vertical beam scanning system

Fig. 4 Scanning system

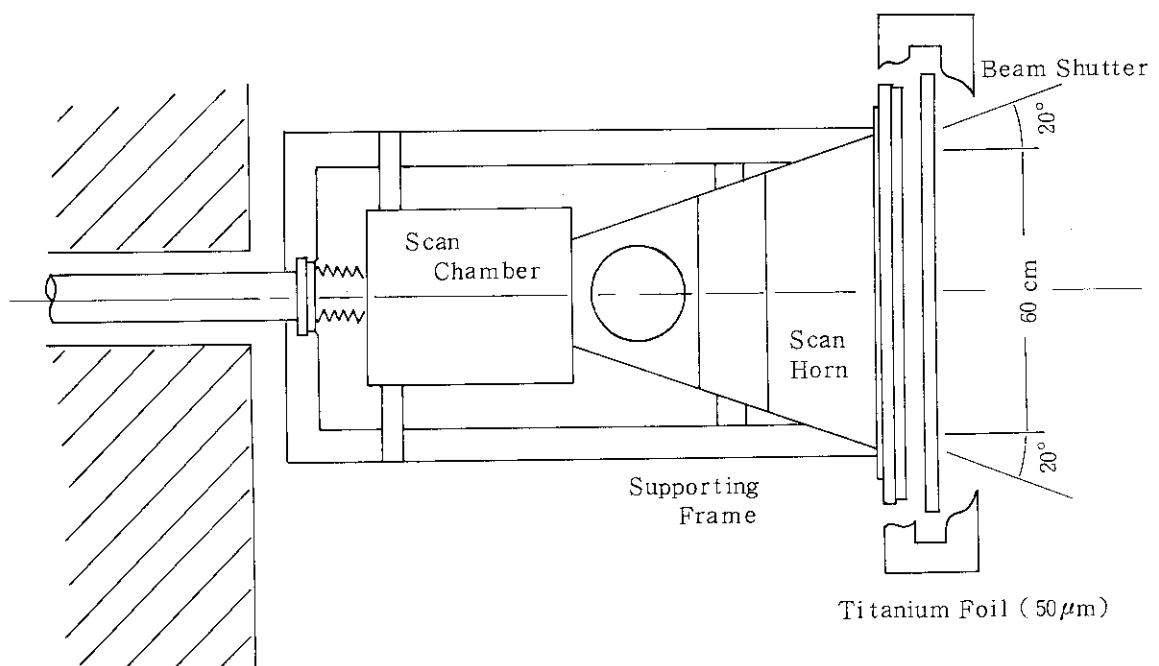
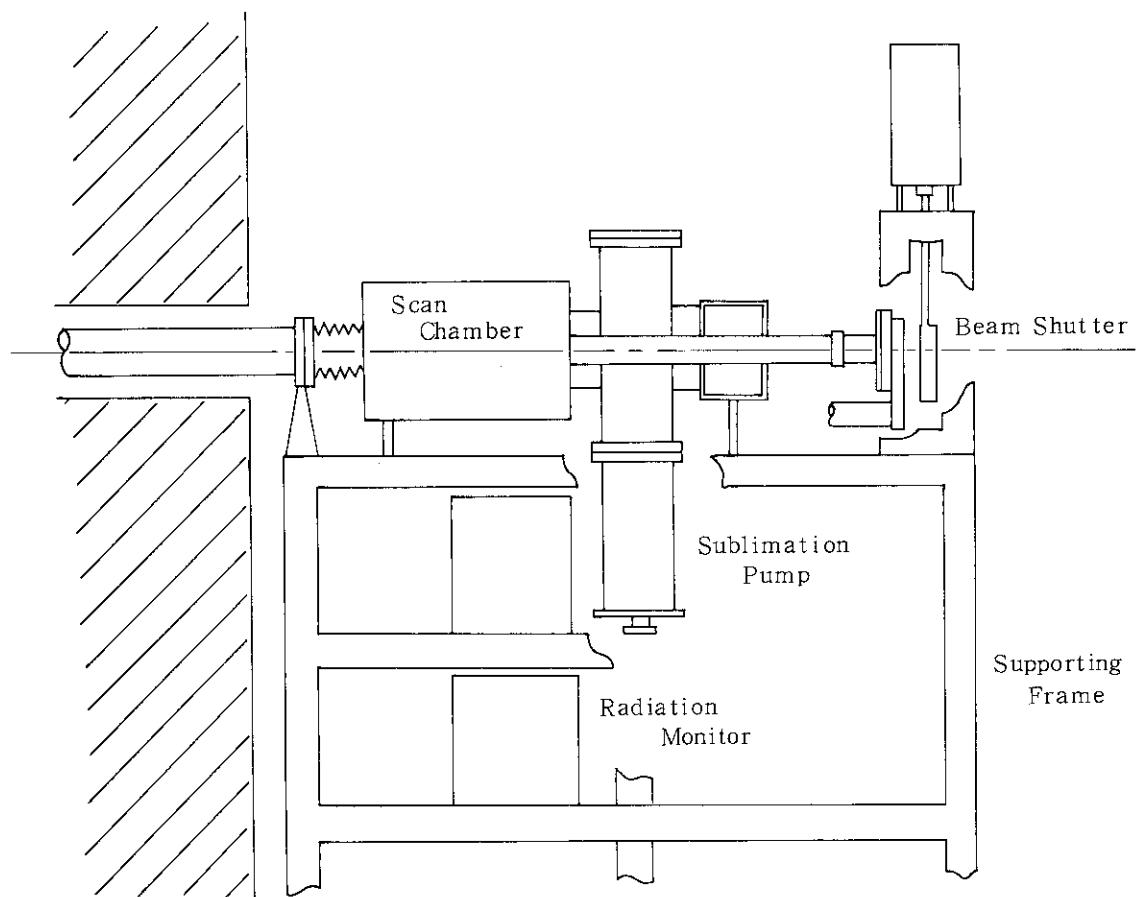


Fig. 4 — b Horizontal beam scanning system

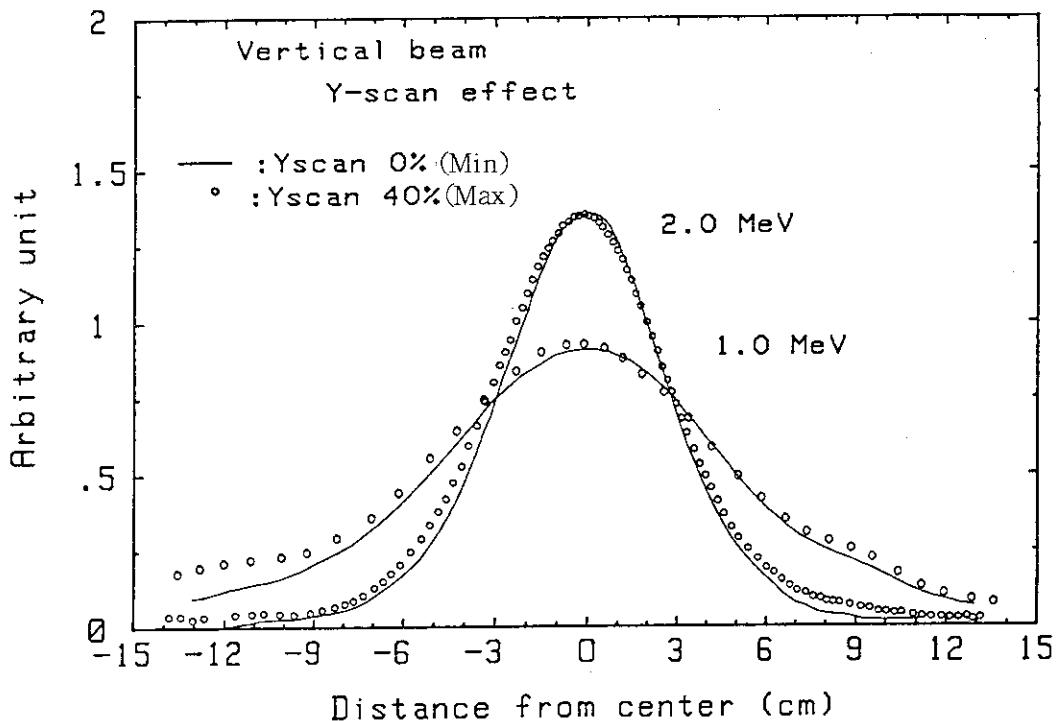


Fig. 5 Effect of the Y-scan system for vertical beam

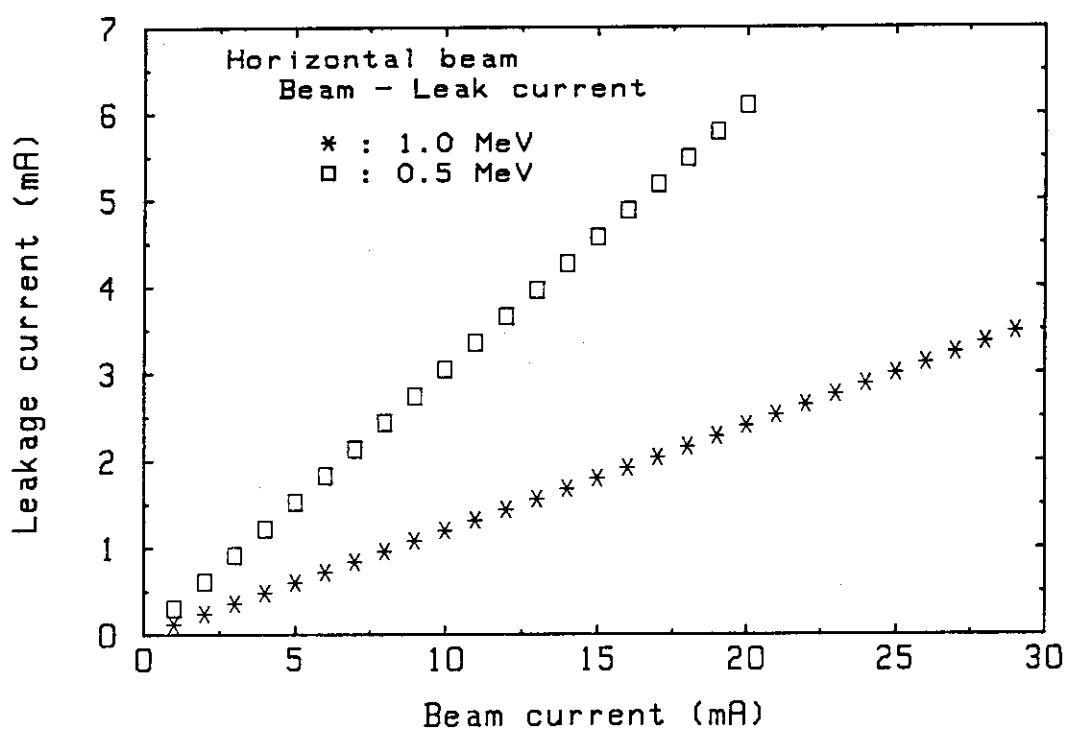
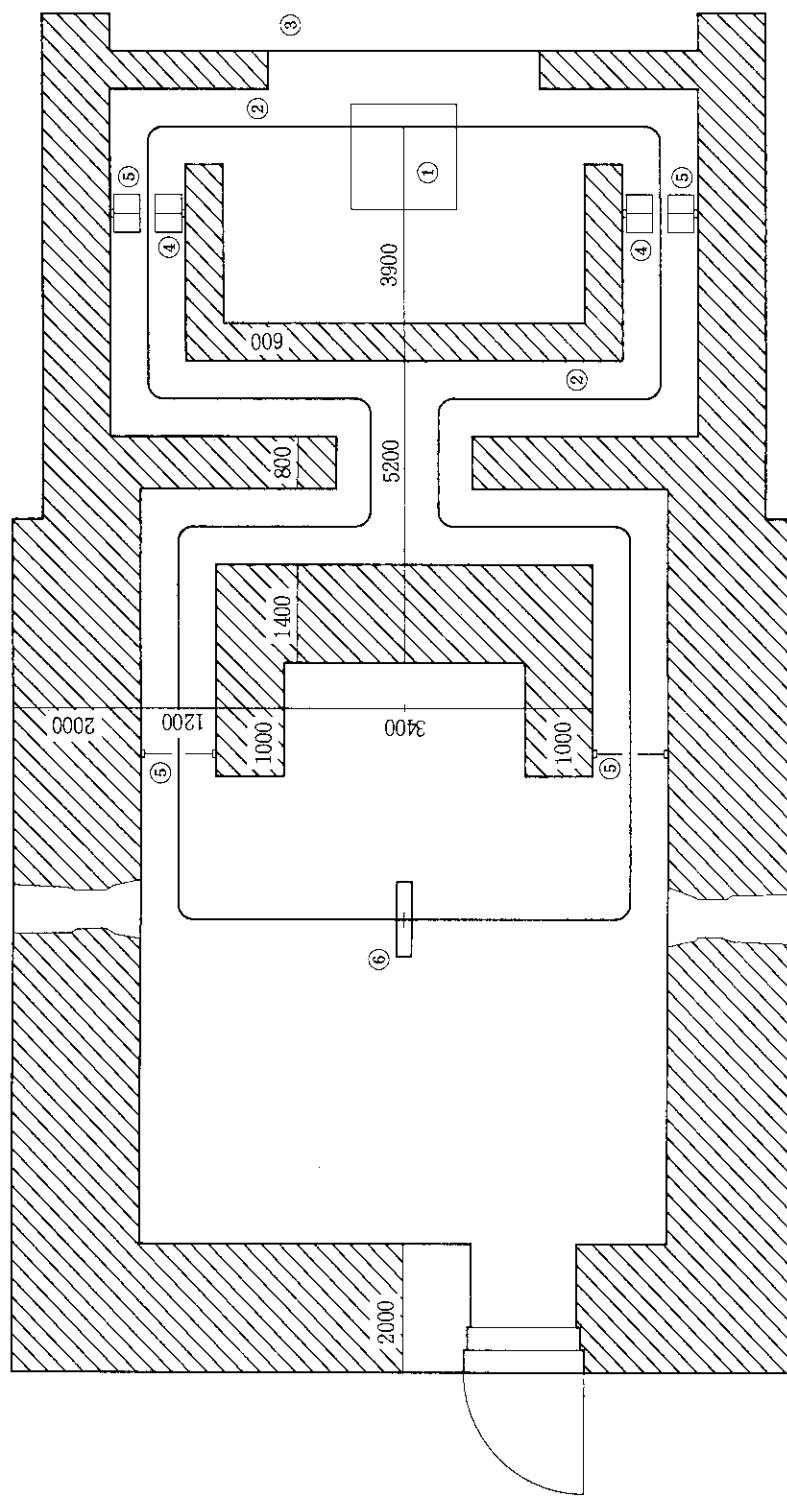


Fig. 6 Relation between the leakage current and the horizontal beam current



- 1. 駆動装置 (Conveyor driving system)
- 2. レール (Conveyor rail)
- 3. オーバースライダー (Safety shutter)
- 4. フットスイッチ (Foot switch)
- 5. 光電管式検知器 (Photoelectric detector)
- 6. 垂直スキャンナー (Vertical scan horn)

Fig. 7 Vertical irradiation room

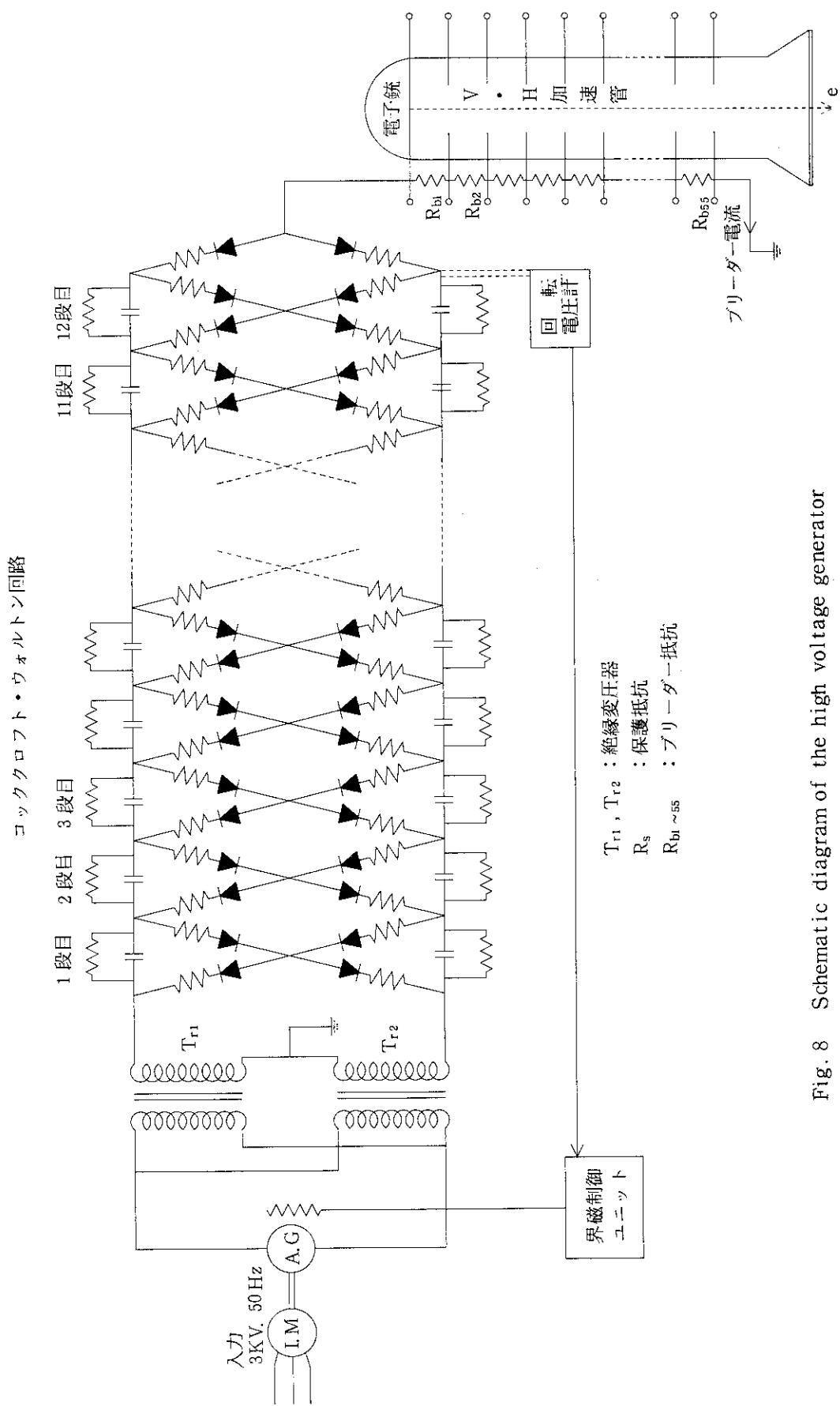


Fig. 8 Schematic diagram of the high voltage generator

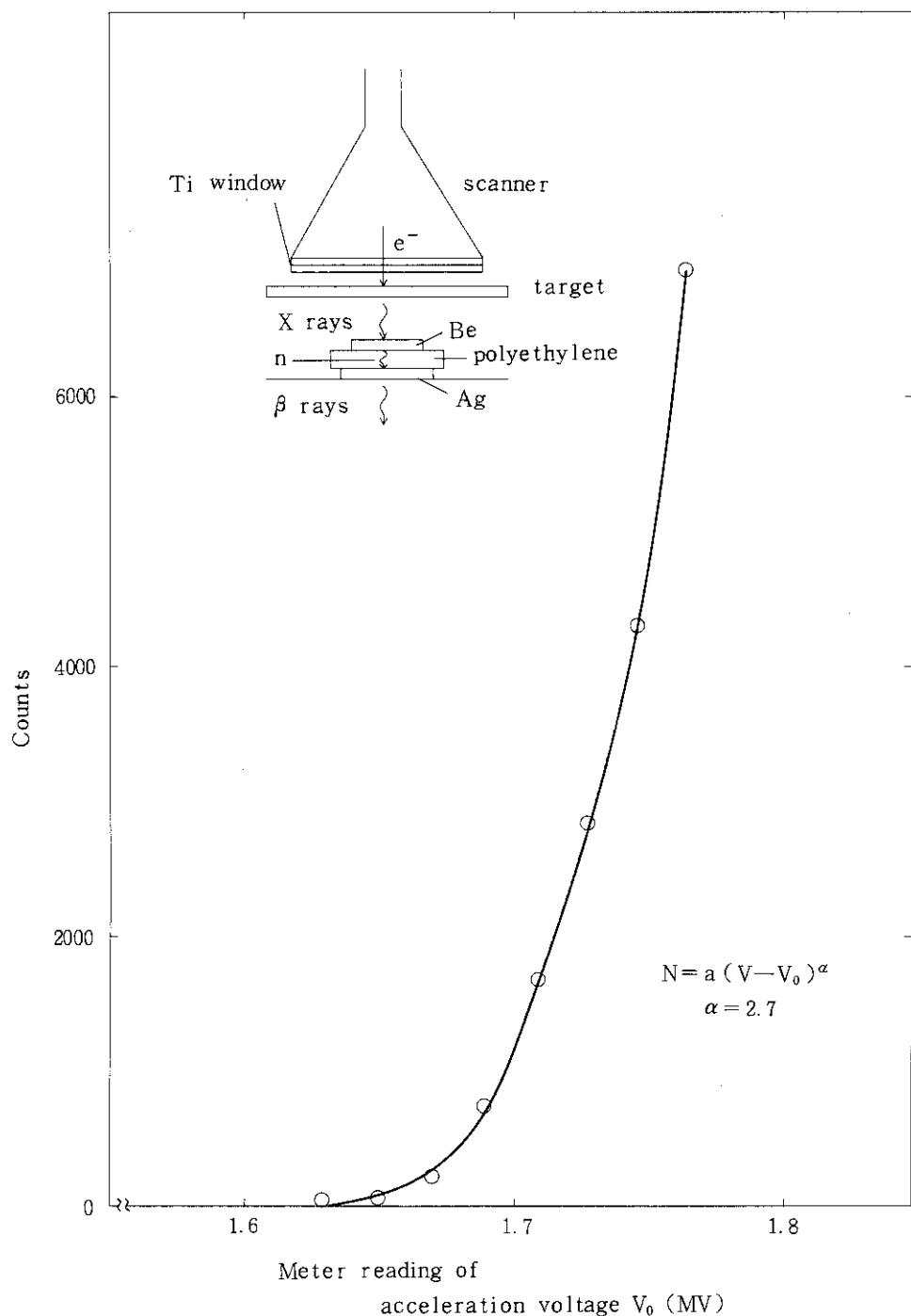


Fig. 9 The result of the acceleration voltage calibration

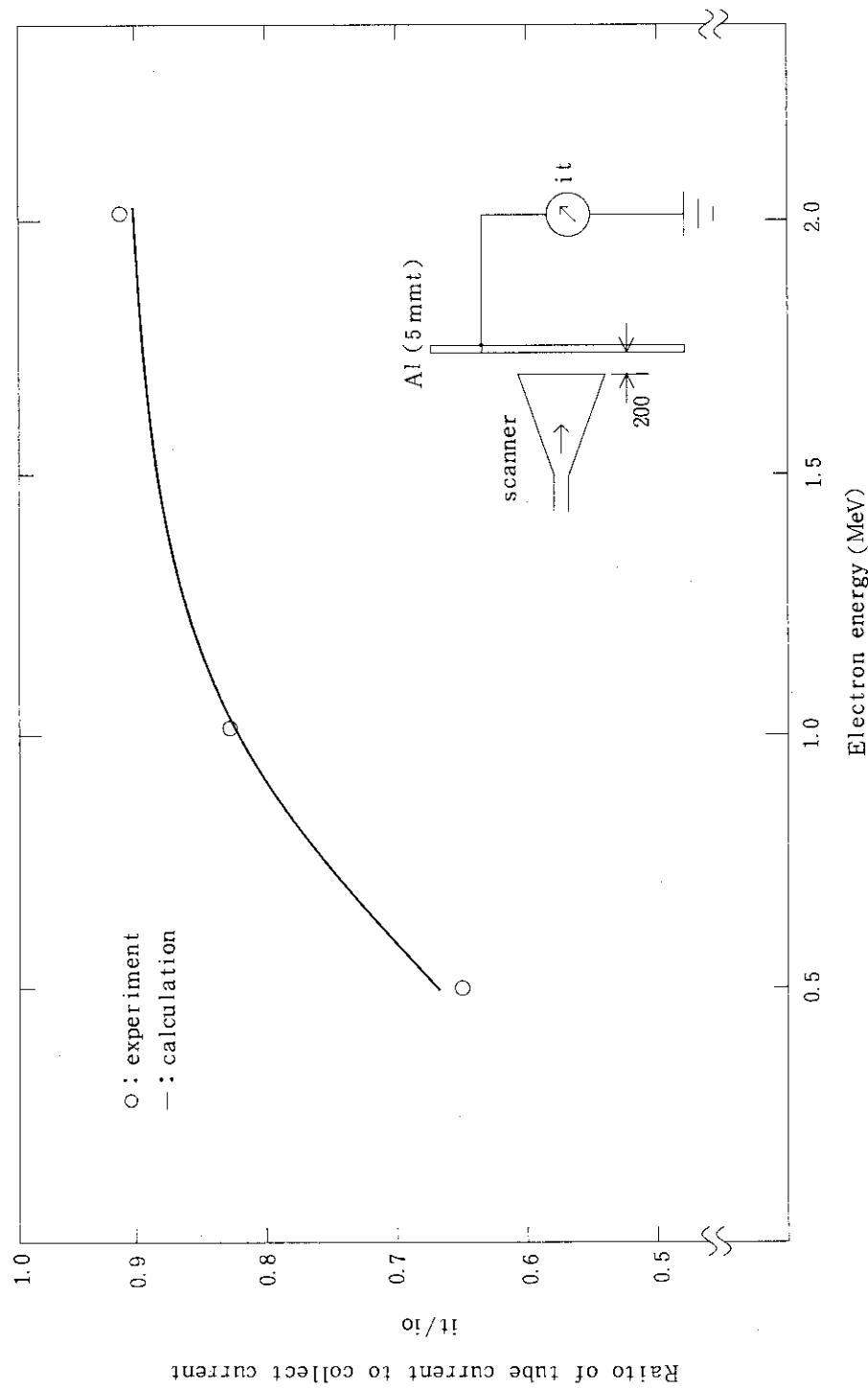


Fig. 10 Relation between the transmitted beam current to the total beam current : circles plotted are measured and solid line is calculated.

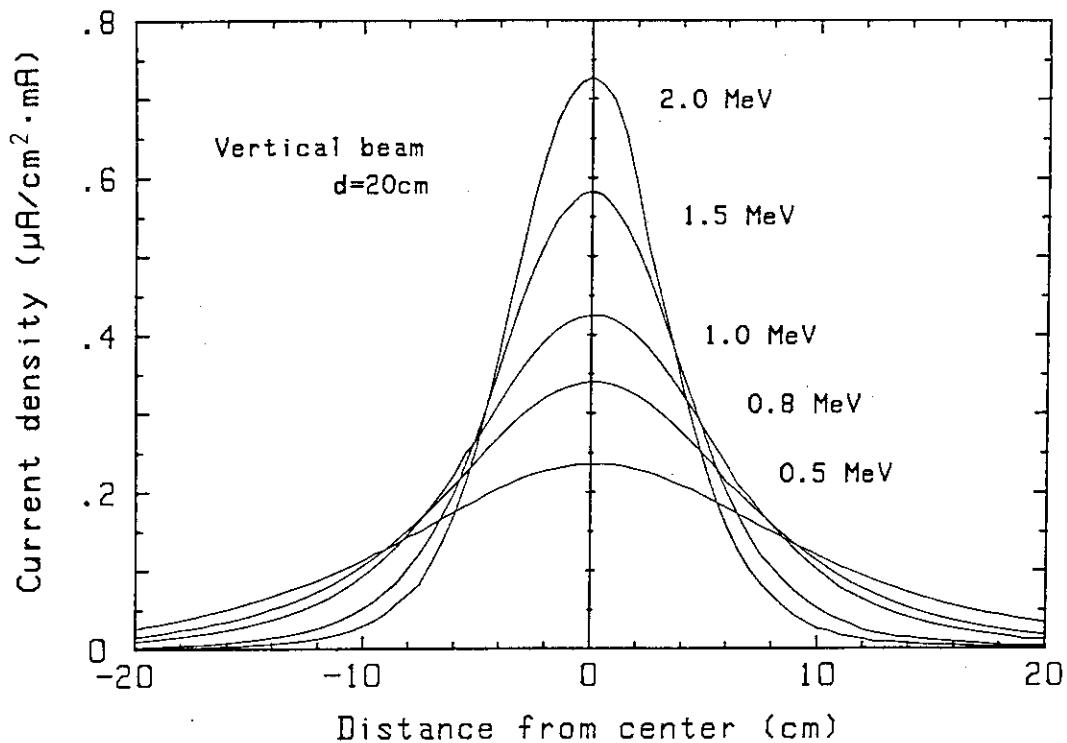


Fig. 11-a Beam current density distribution in the direction of Y axis

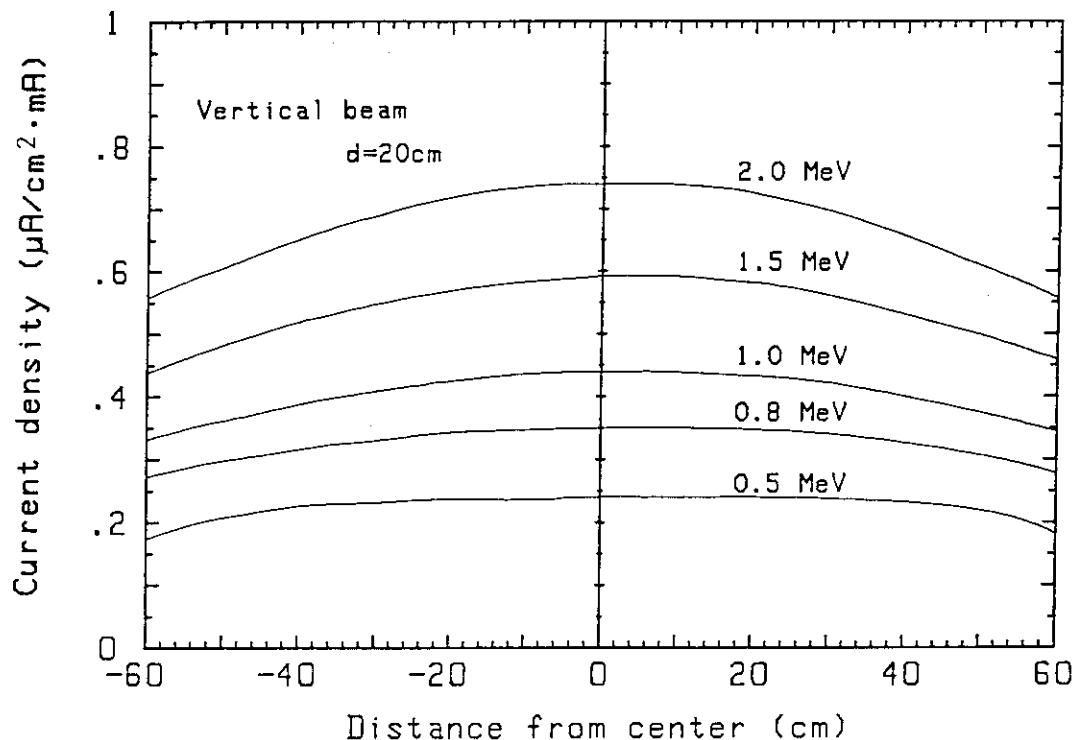


Fig. 11-b Beam current density distribution in the direction of X axis

Fig. 11 Vertical beam current density distribution at 20 cm from the beam window

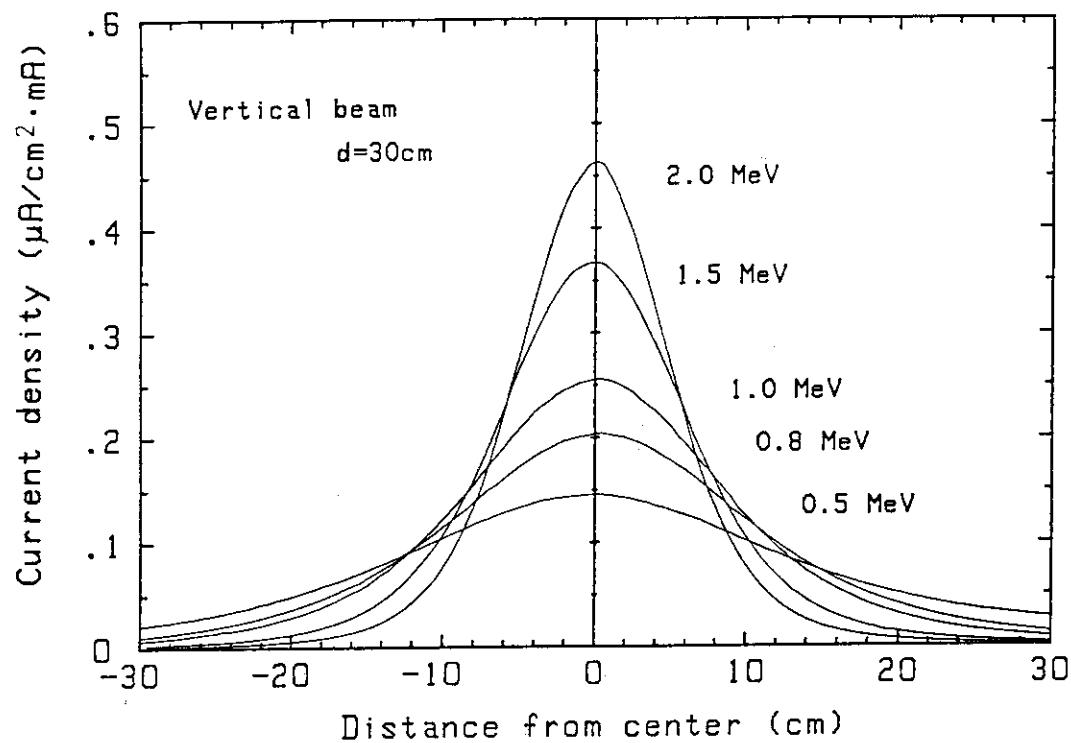


Fig. 12 - a Beam current density distribution in the direction of Y axis

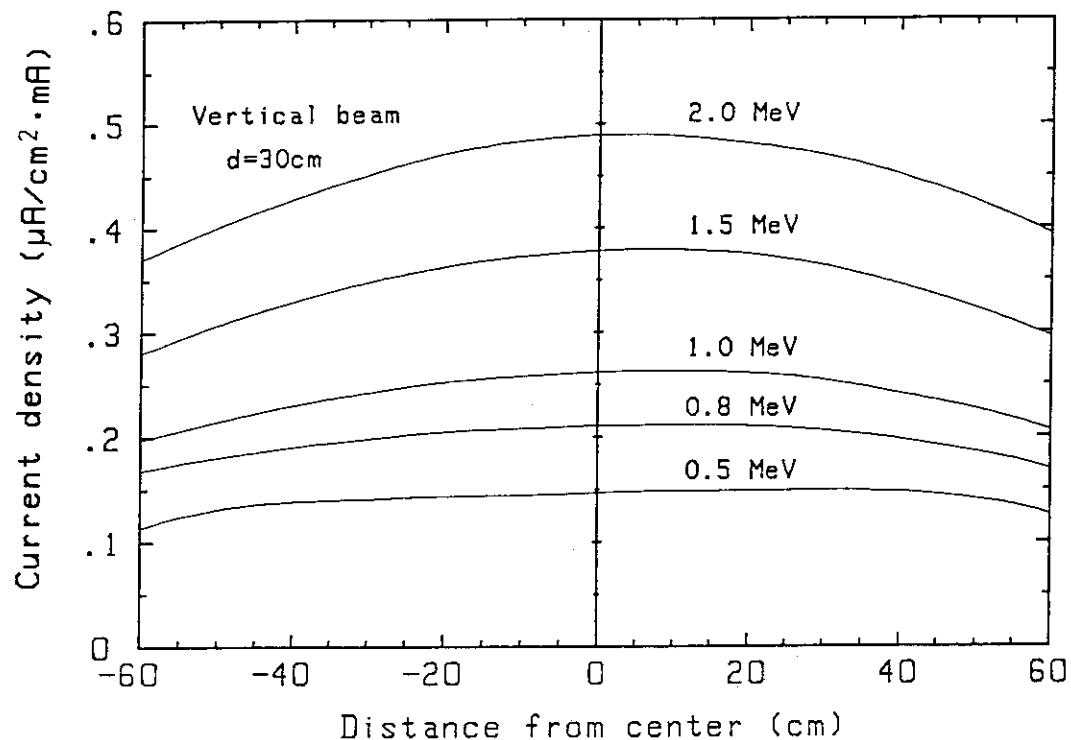


Fig. 12 - b Beam current density distribution in the directon of X axis

Fig. 12 Vertical beam current density distribution at 30 cm from the beam window

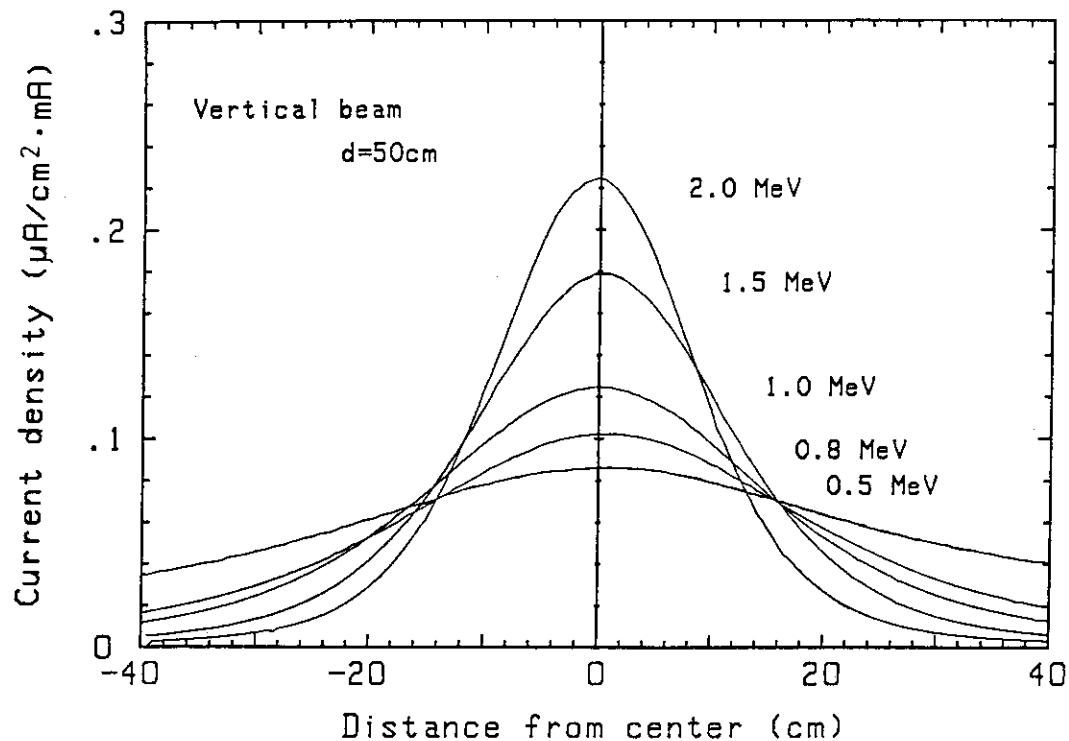


Fig. 13 Vertical beam current density distribution in the direction of Y axis at 50 cm from the beam window

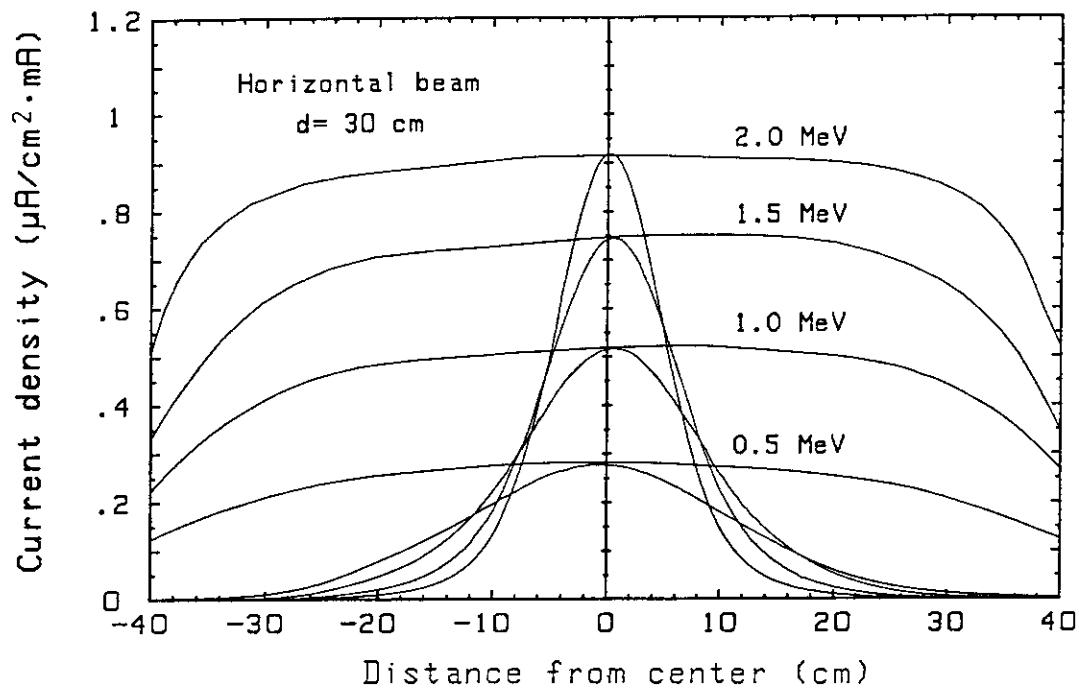


Fig. 14 — a Beam current density distribution at 30 cm from the beam window

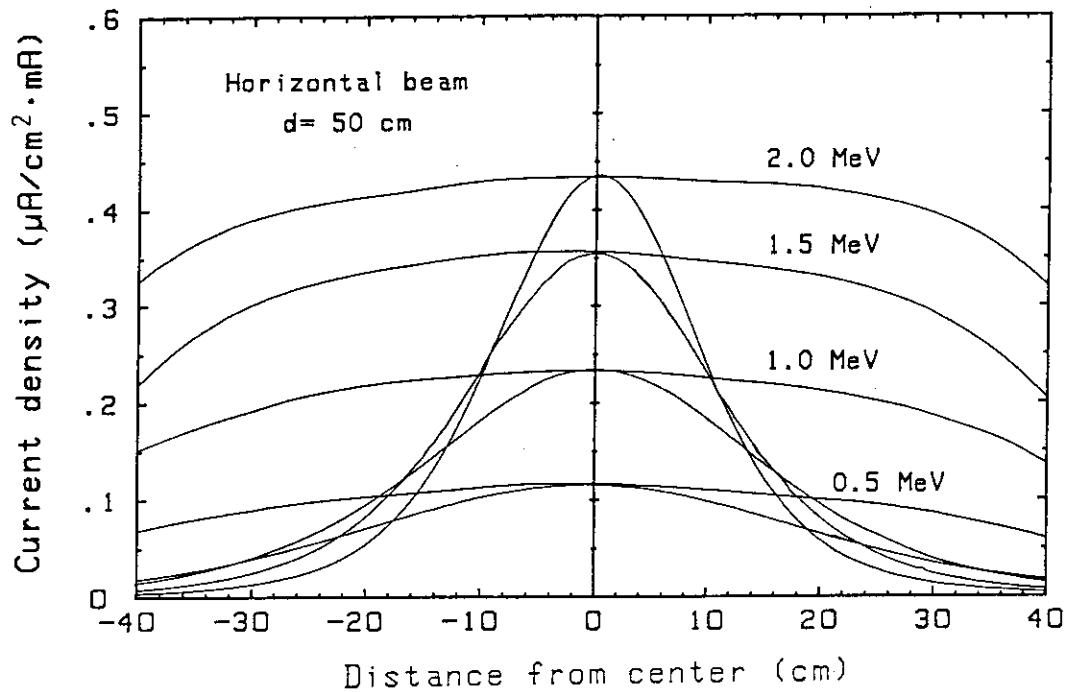


Fig. 14 — b Beam current density distribution at 50 cm from the beam window

Fig. 14 Horizontal beam current density distribution

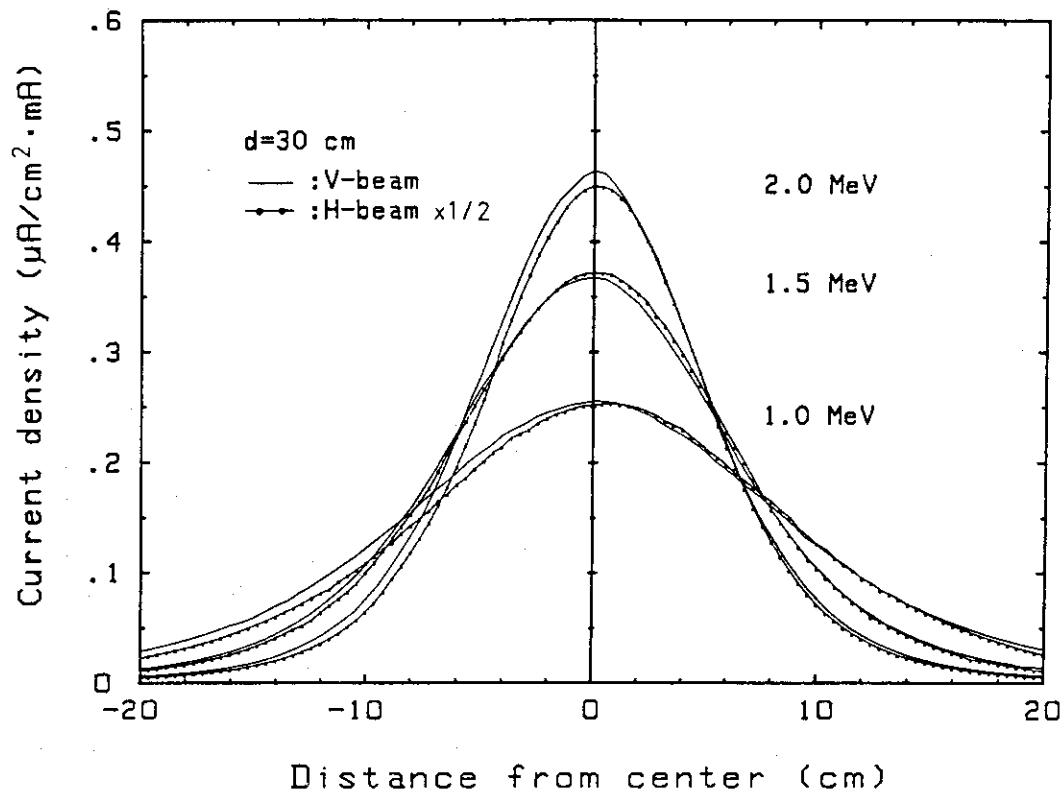


Fig. 15 Comparison of the vertical beam current density distribution and the horizontal beam distribution. The direction of Y axis at 30 cm from the beam window.

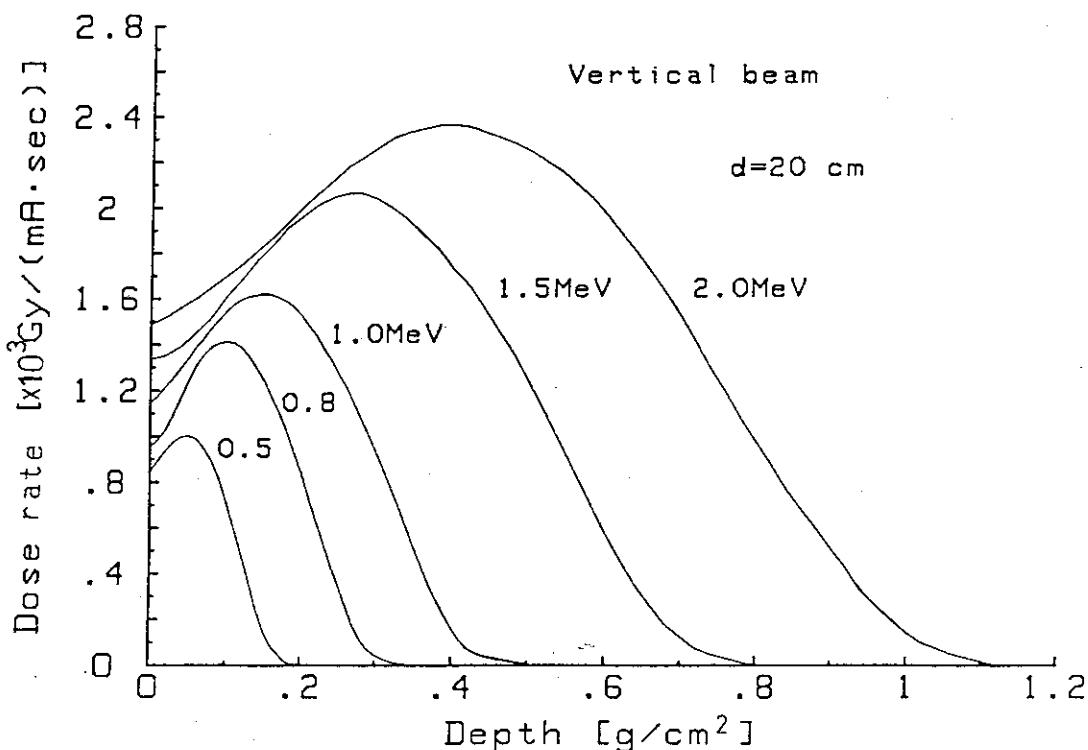


Fig. 16 Depth dose distributions in CTA film stack obtained by fixed irradiation.

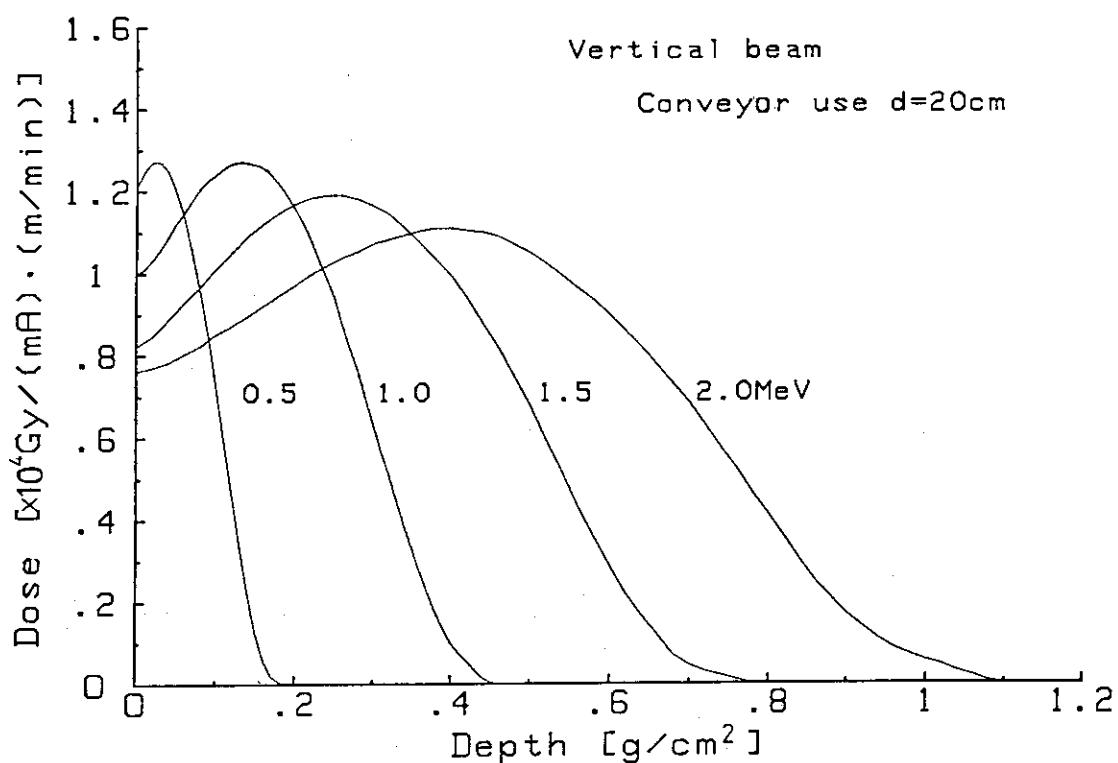


Fig. 17 Depth dose distributions in CTA film stack obtained by conveyor use irradiation.

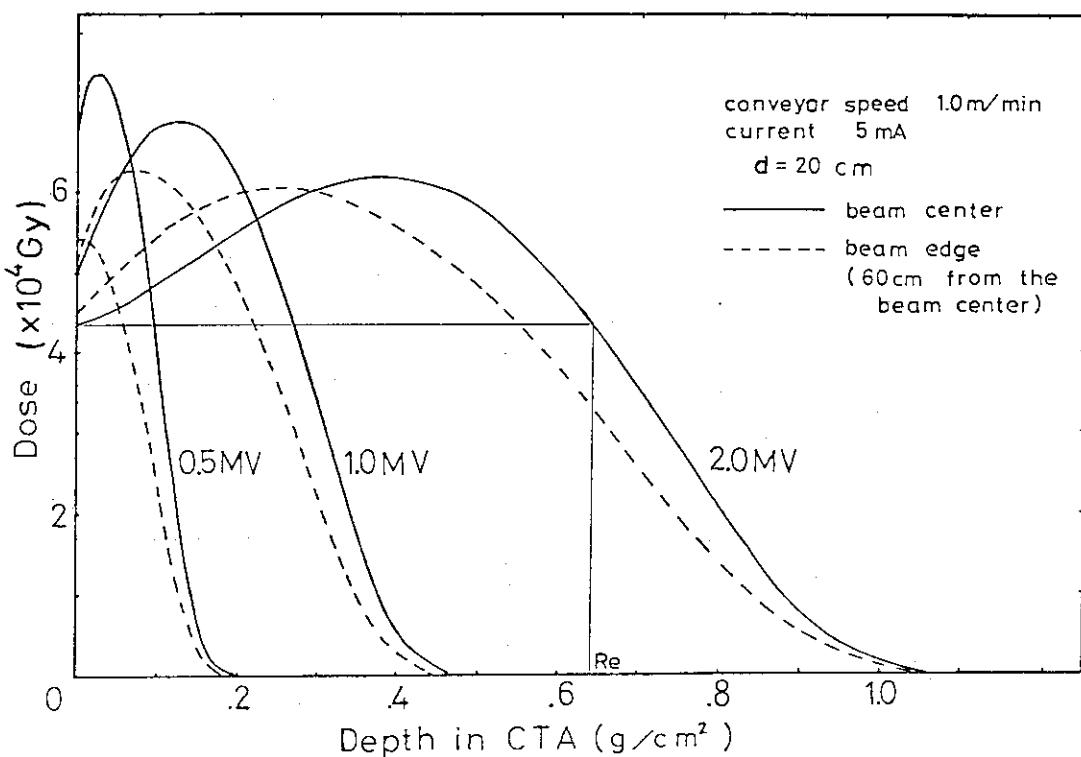


Fig. 18 Depth dose distributions in CTA. Solid-line are obtained at the beam center and dashed-line are obtained at the edge of scanhorn

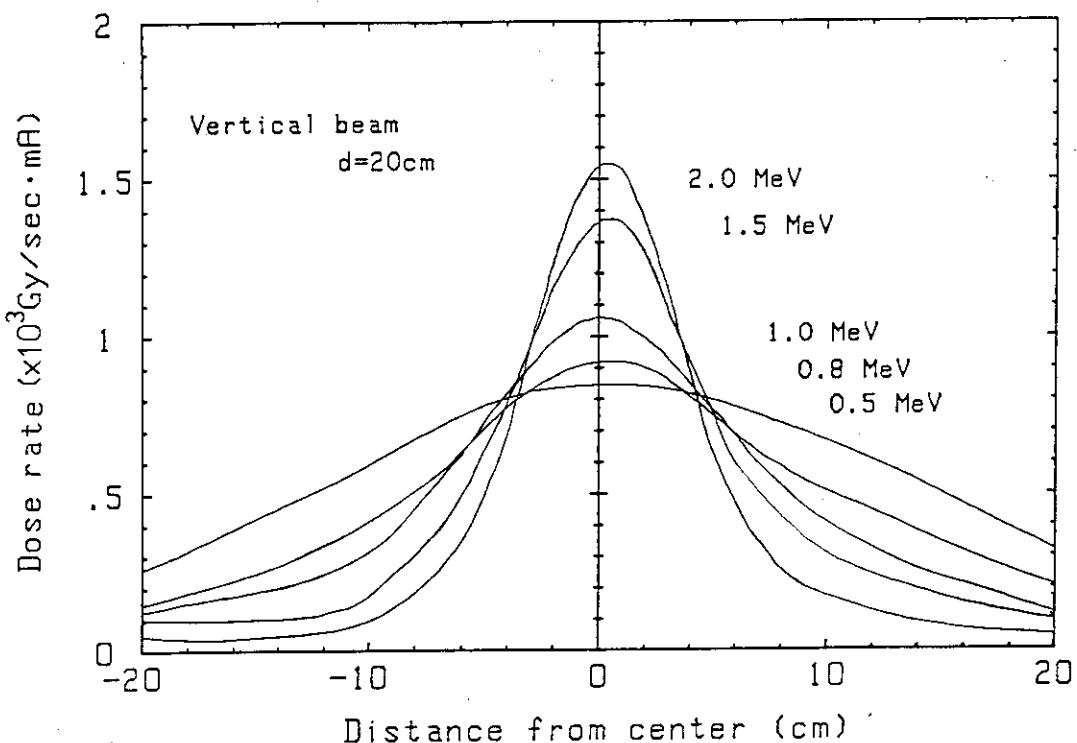


Fig. 19-a Dose rate distribution in the direction of Y axis

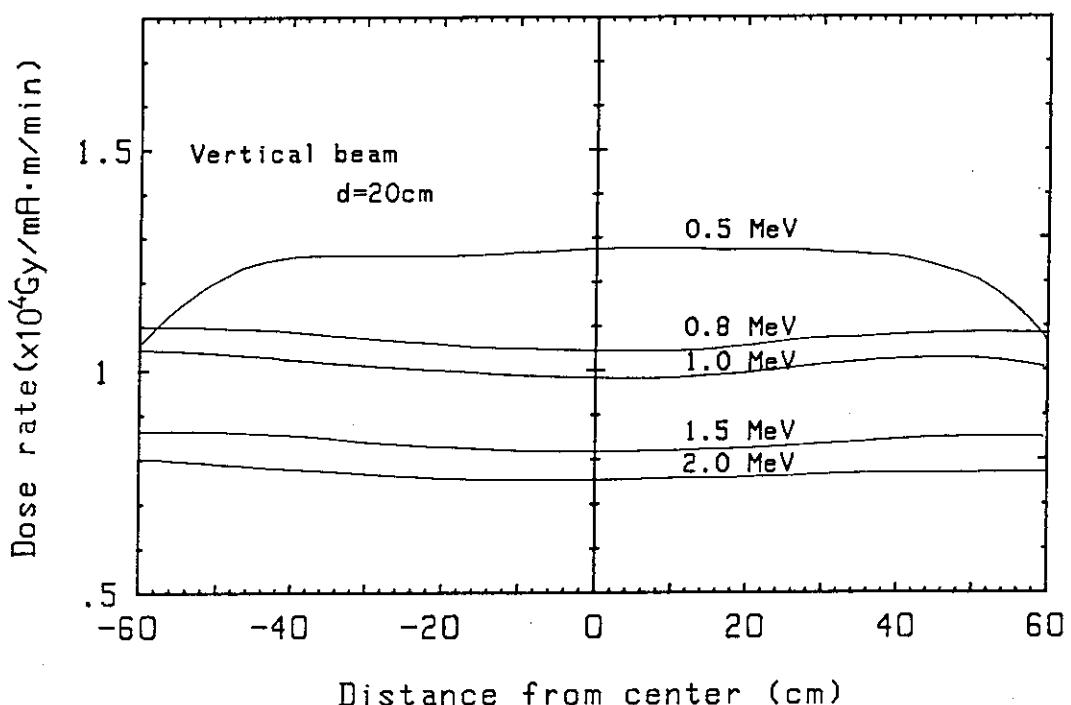


Fig. 19-b Dose rate distribution in the direction of X axis

Fig. 19 Dose rate distribution of vertical beam at 20 cm from the beam window obtained by CTA film

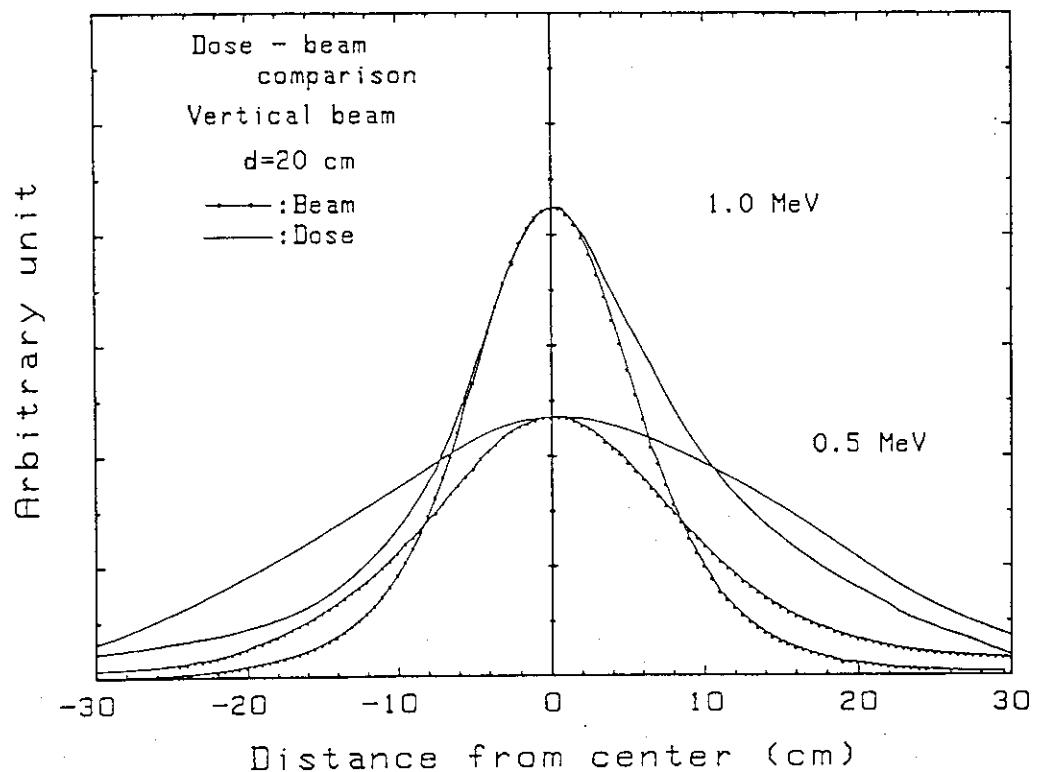


Fig. 20 Comparison of the beam current density distribution with the surface dose rate distribution in the direction of Y axis at 20 cm from the beam window

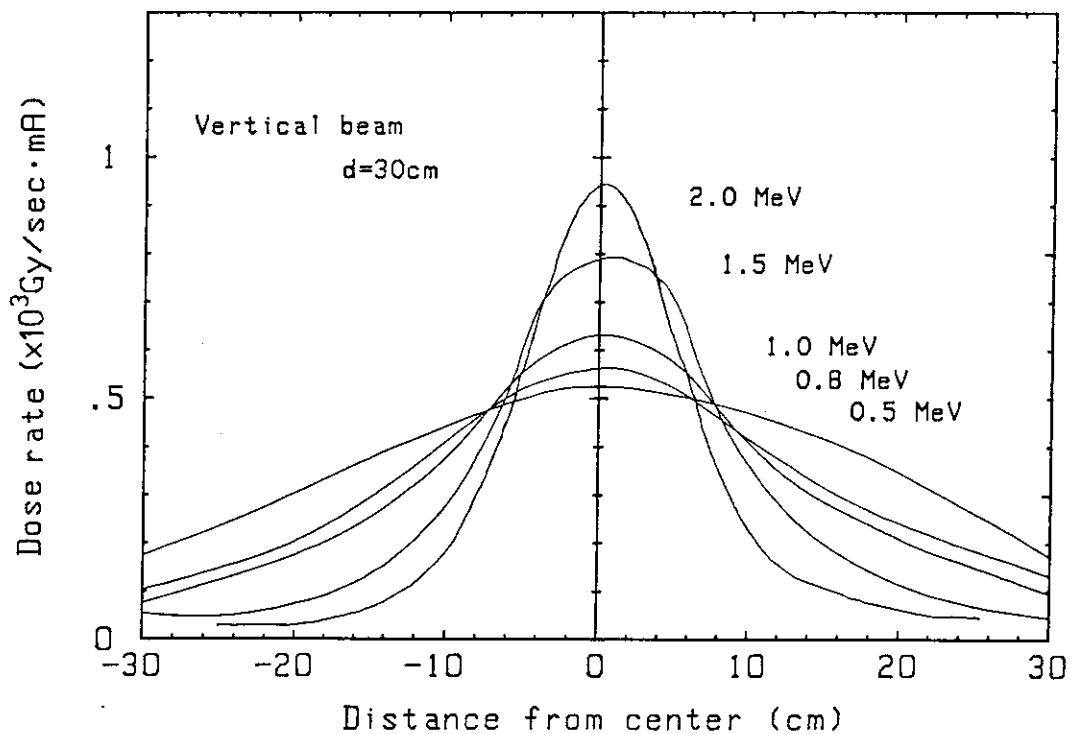


Fig. 21-a Dose rate distribution in the direction of Y axis

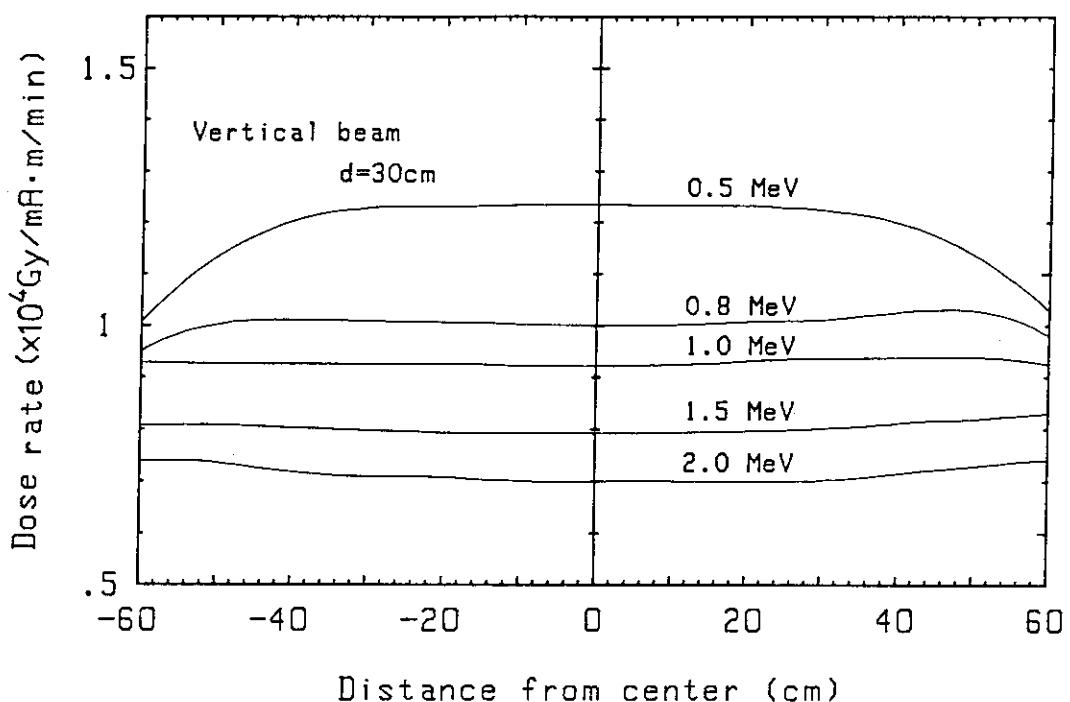


Fig. 21-b Dose rate distribution in the direction of X axis

Fig. 21 Dose rate distribution of vertical beam at 30 cm from the beam window obtained by CTA film

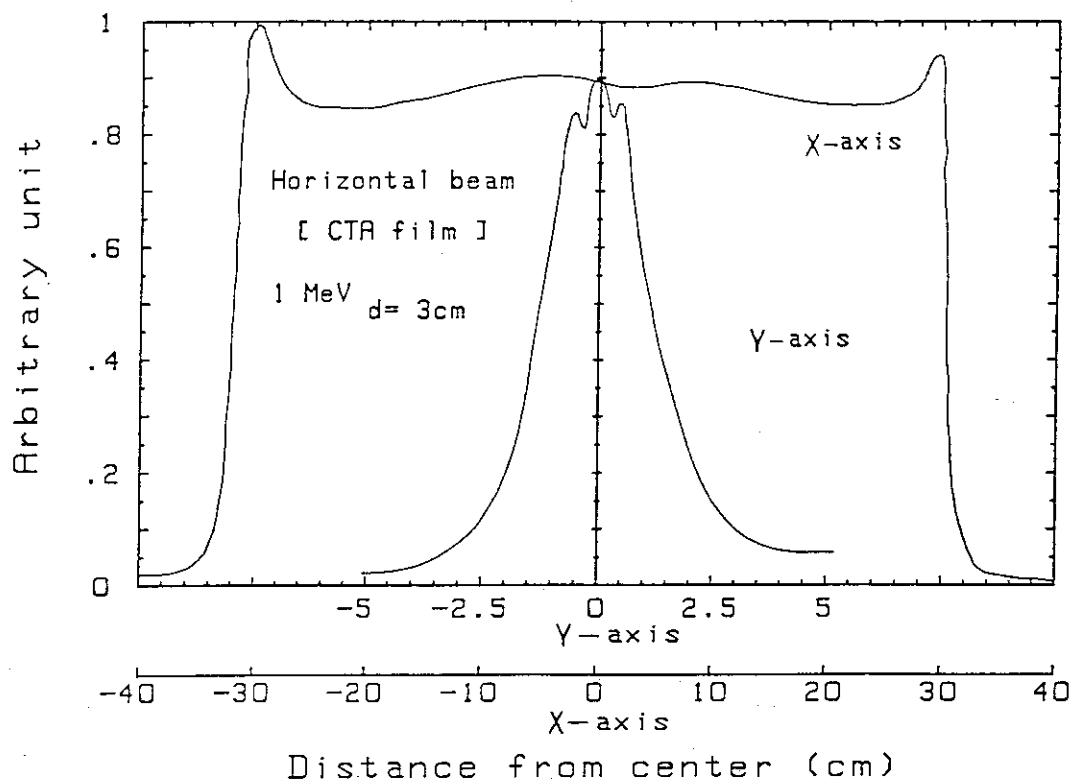


Fig. 22 Dose rate distribution of horizontal beam at 3 cm from the beam window

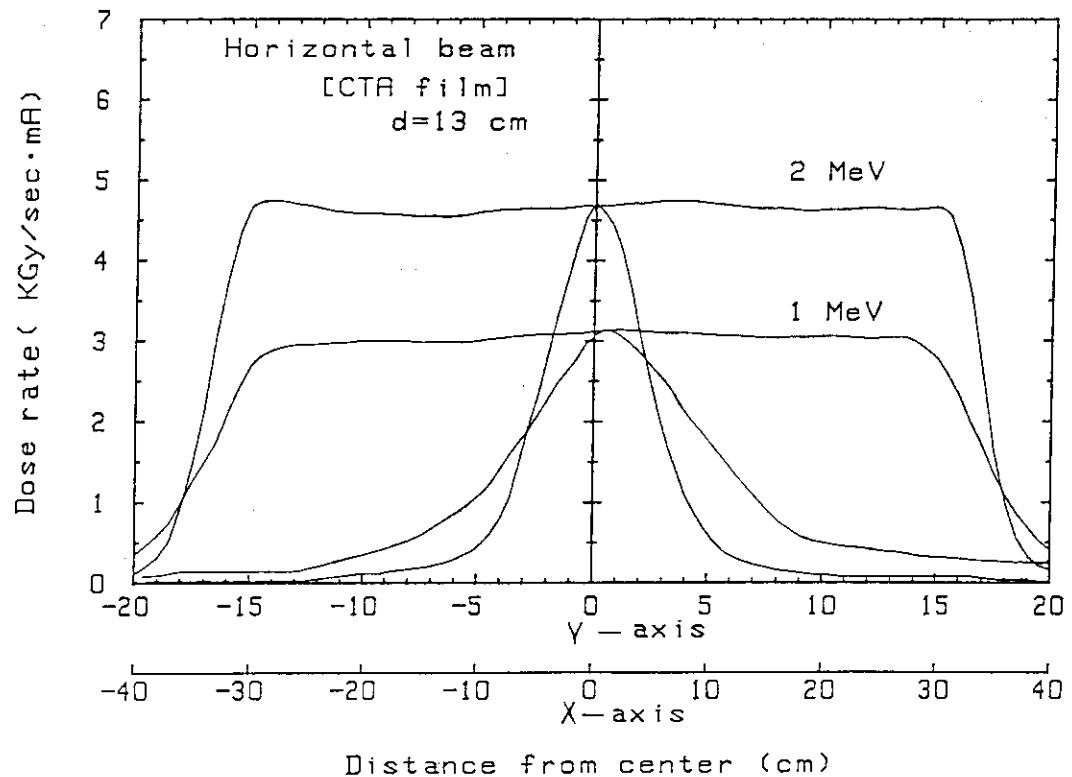


Fig. 23 Dose rate distribution of horizontal beam at 13 cm from the beam window

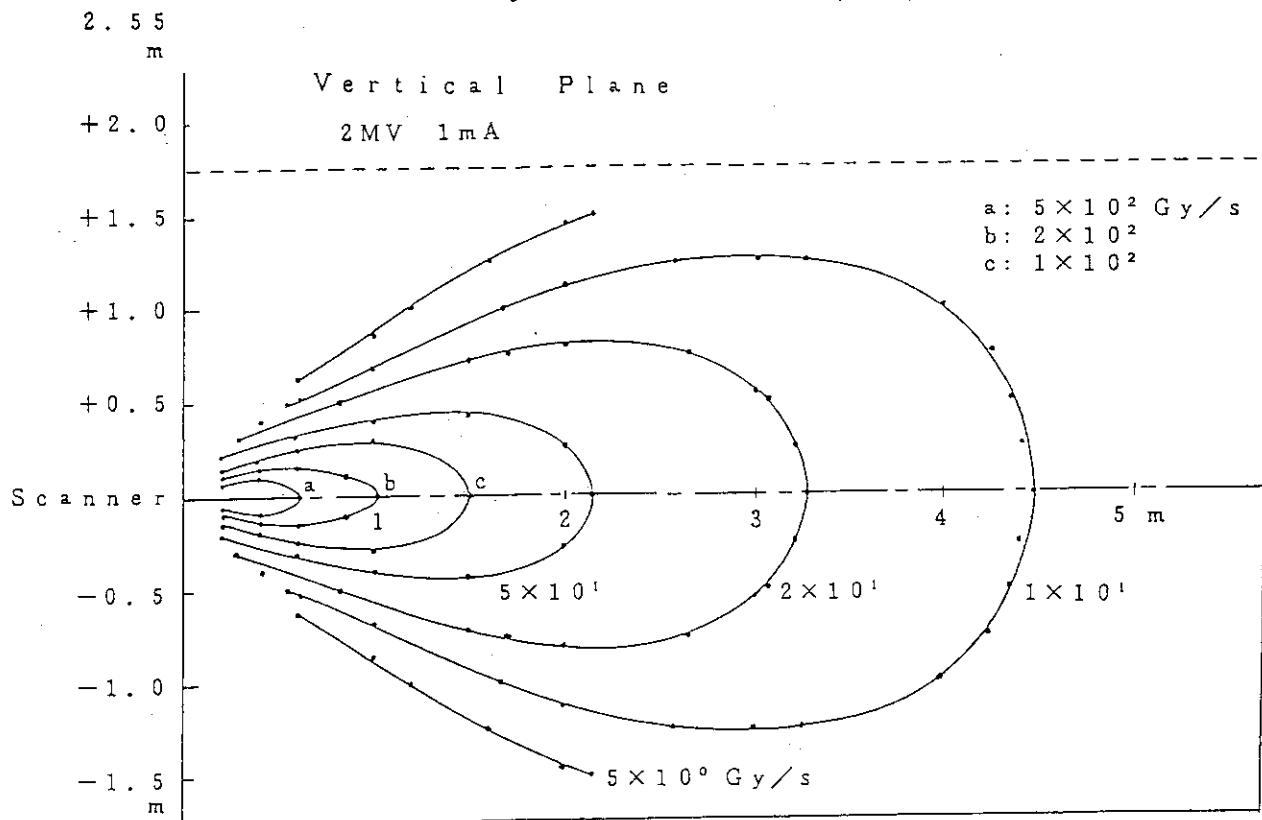


Fig. 24 Air iso-dose rate map in the vertical plane in the horizontal beam irradiation room

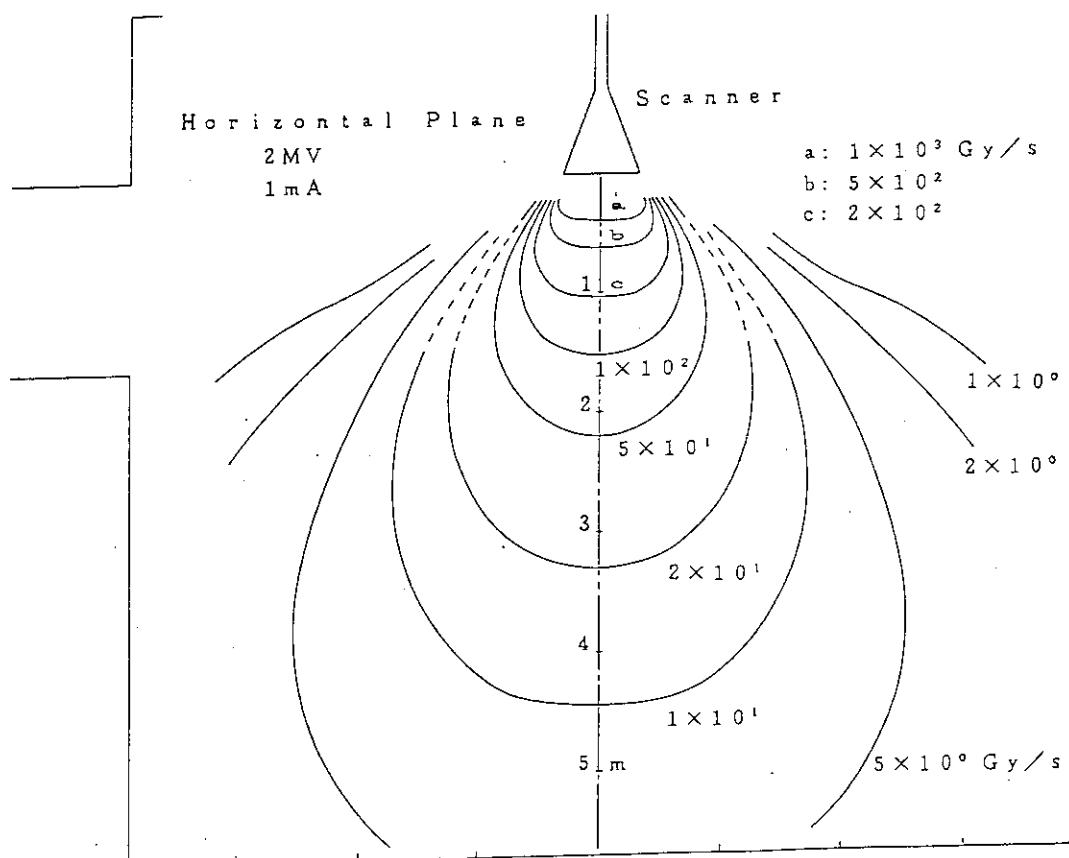


Fig. 25 Air iso-dose rate map in the horizontal plane in the horizontal beam irradiation room

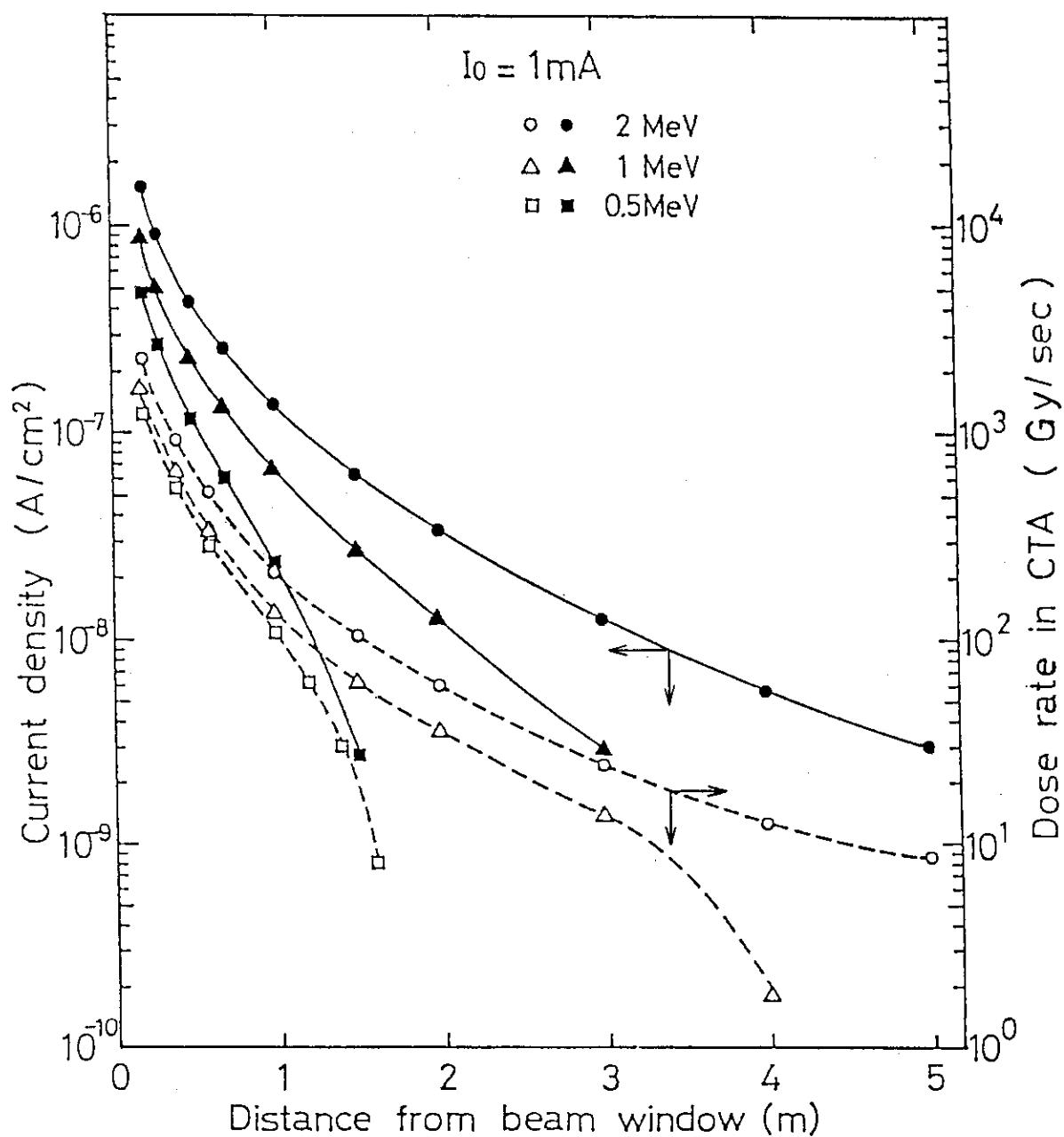


Fig. 26 Changes of beam current density and dose rate with distance from the beam window

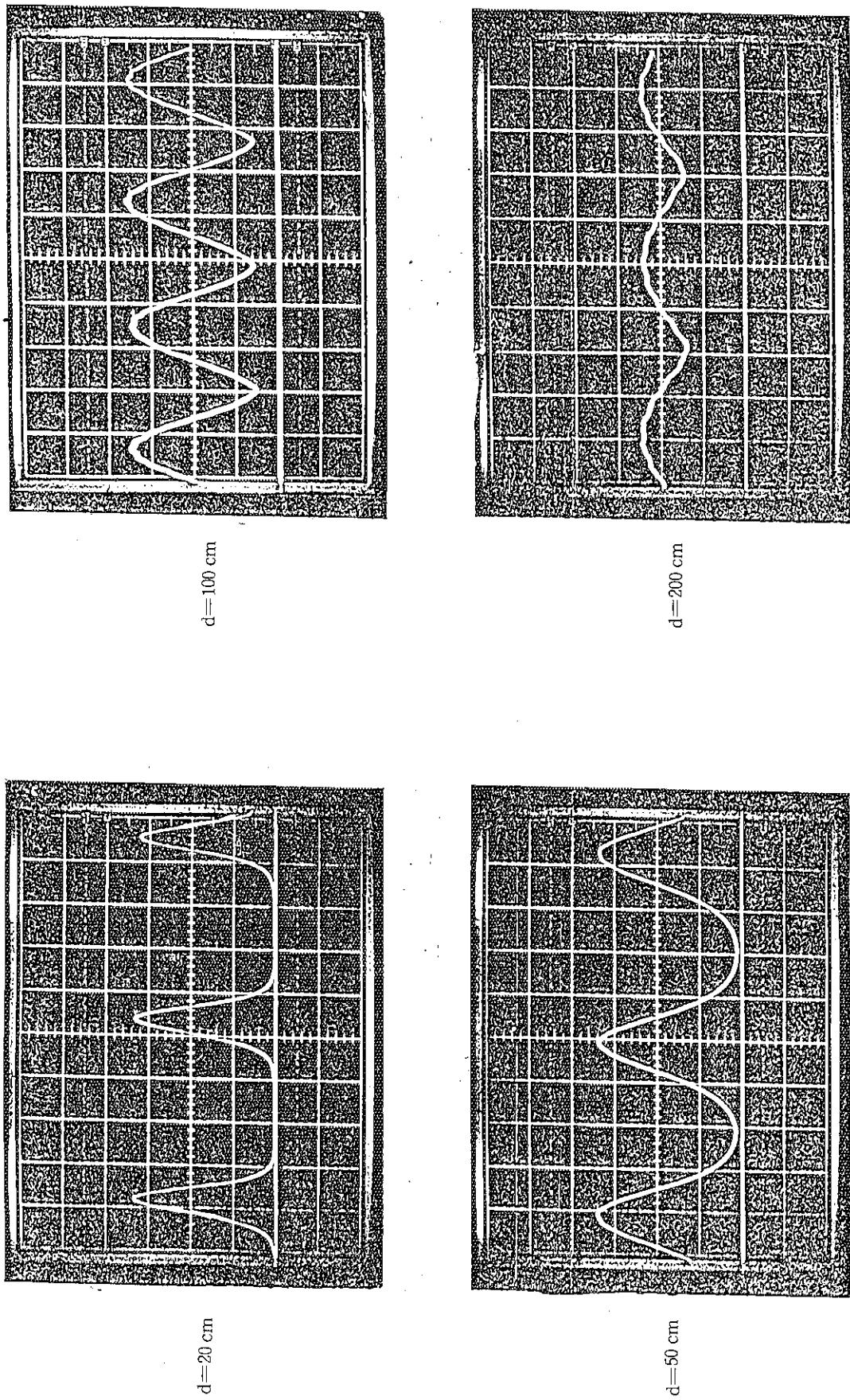


Fig. 27 Change of beam pulse patterns with distance from the beam window. Beam energy is 1 MeV

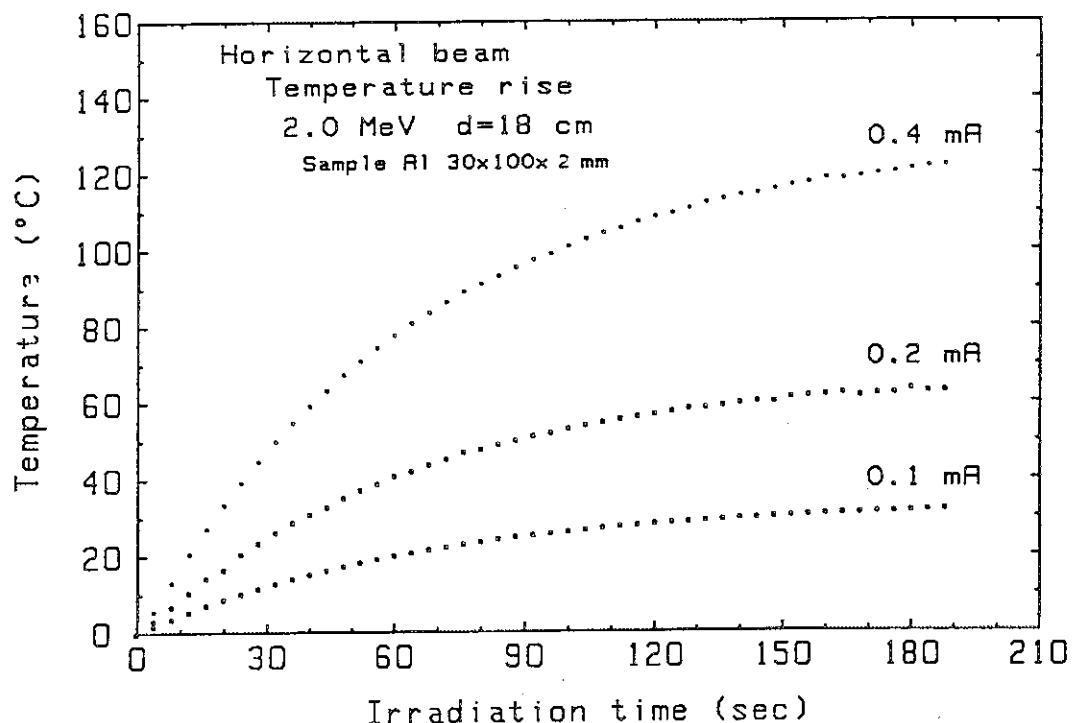


Fig. 28 Temperature rise in a aluminum sample during horizontal beam irradiation in different beam currents

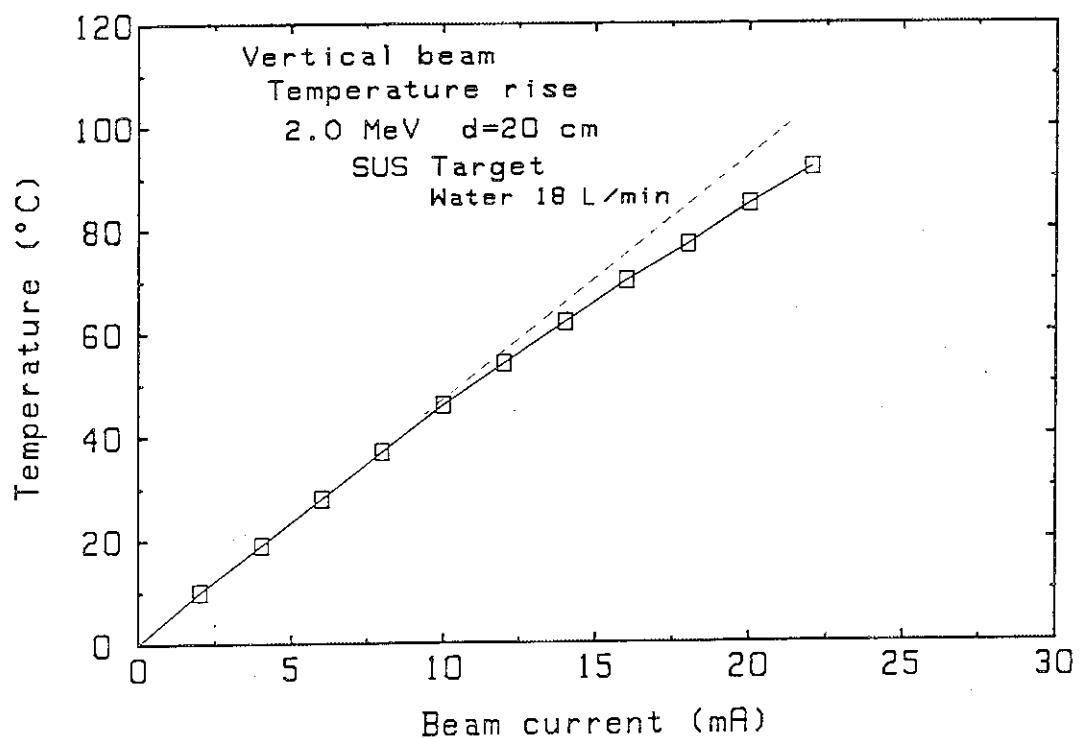


Fig. 31 Temperature rise in a stainless steel target during the vertical beam irradiation in different beam currents

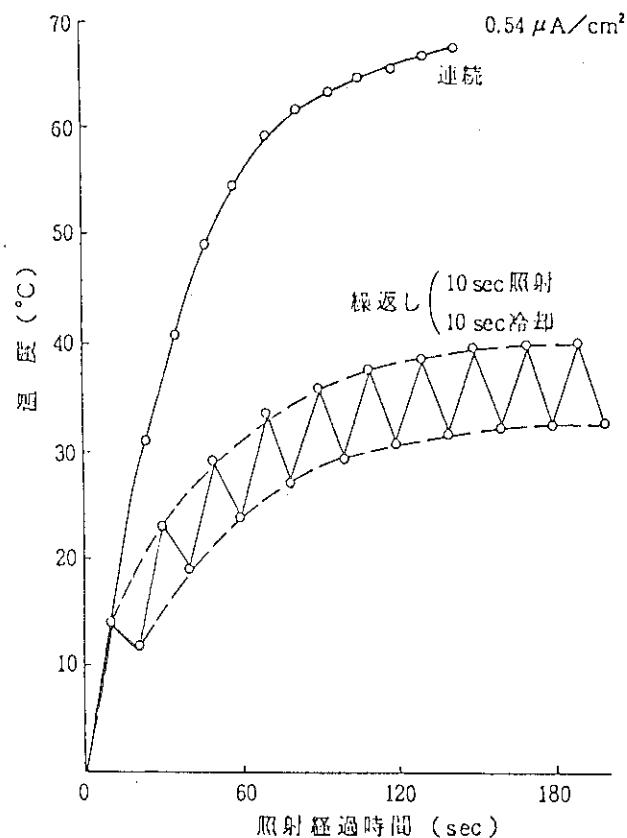


Fig. 29 繰返し照射と連続照射の比較例

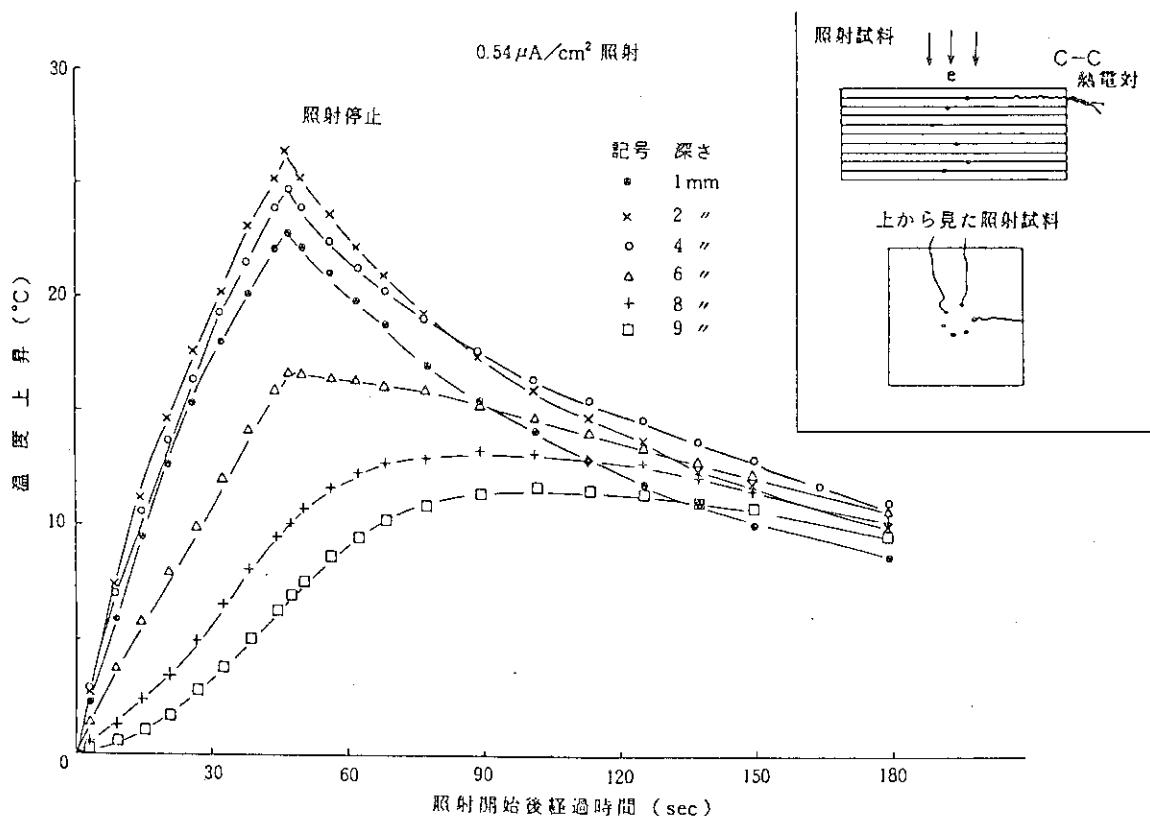


Fig. 30 プラスチック試料内部の温度上昇の厚さによる変化